

## **Fortschrittsbericht**

# **Forschungsvorhaben zum Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“**

Berichtszeitraum

01. Juli - 31. Dezember 2021

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH

## Fortschrittsbericht

Forschungsvorhaben  
zum Förderkonzept  
„FORKA - Forschung  
für den Rückbau  
kerntechnischer  
Anlagen“

Berichtszeitraum  
1. Juli - 31. Dezember 2021

Vom Bundesministerium  
für Bildung und Forschung  
geförderte Vorhaben

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Vorwort**

*„Deutschland steht in den nächsten Jahrzehnten vor erheblichen Rückbau- und Entsorgungsaufgaben, die aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und aus früherer staatlicher Förderung kerntechnischer Entwicklungen resultieren.“*

(Auszug aus dem Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“)

Mit dem Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“ unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren die Bewältigung der anstehenden Aufgaben.

Im Auftrag des BMBF informiert die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH halbjährlich über den Stand der im Rahmen von FORKA geförderten Forschungsprojekte. Dazu gibt sie eine eigene Fortschrittsberichtsreihe heraus. Jeder Fortschrittsbericht stellt eine Sammlung von Einzelberichten der geförderten Projekte dar, die von den Forschungsstellen selbst als Dokumentation ihres Arbeitsfortschritts in einheitlicher Form erstellt werden.

Berichte ab dem Jahr 2017 sind über die Webseite des Projektträgers GRS (<https://www.grs.de/de/projekttraeger/rueckbau>) öffentlich verfügbar. Auf Fortschrittsberichte aus früheren Jahren kann über die Webseite des Projektträgers Karlsruhe (<http://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/wte/287.php>) zugegriffen werden.

Die inhaltliche Gliederung der Berichtssammlung orientiert sich an den fachlichen Schwerpunkten des Förderkonzeptes FORKA. Die Anordnung der einzelnen Berichte erfolgt nach aufsteigenden Förderkennzeichen.

Verantwortlich für den Inhalt der Fortschrittsberichte sind deren Verfasser. Die GRS übernimmt keine Gewähr insbesondere für Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
<b>01.</b>	<b>Zerlege- und Dekontaminationsverfahren</b>	
15S9415A	Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilprojekt: Entwicklung eines innovativen Schneidwerkzeug-Demonstrators und eines Prüfverfahrens inkl. Prüfstand zur experimentellen Untersuchung.	8
15S9415B	Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilprojekt: Konzeptionierung, Herstellung und Erprobung eines neuartigen Befestigungs- und Trägersystems, der Zustelleinheit sowie des Antriebs des Rohrintrenners.	11
15S9416A	Verbundvorhaben: Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Durchführung experimentelle Versuche und Auswertung an Versuchsmuster	13
15S9416B	Verbundvorhaben: Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	16
15S9416C	Verbundvorhaben: Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	19
15S9416D	Verbundvorhaben: Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Praxisversuche und Verifizierung	22
15S9418A	Verbundvorhaben: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDeco) Teilprojekt: Ermittlung von Sekundäremissionen bei der laserbasierten Dekontamination und Praxiserprobung	25
15S9418B	Verbundvorhaben: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDeco) Teilprojekt: Untersuchungen zur thermischen Zersetzung, zum Partikeltransport und zur Lackdetektion auf Betonoberflächen	28
15S9421A	Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kernkraftwerken - Teilprojekt: Verfahrenstechnik und Engineering	31
15S9421B	Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kraftwerken; Teilprojekt: Autonome Digitalisierung und Entschichtung von Baugruppen	35
15S9424	Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung	39
15S9425A	Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: Parametervalidierung zum Tiefschnitt von hochbewehrtem Stahlbeton und Erprobung eines neuartigen Anbaugeräts zur Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen	42
15S9425B	Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: „Konzeptionierung eines hochflexiblen Anbaugerätes als Prüfstand zur experimentellen Untersuchung für die Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen sowie Neukonzeptionierung eines Absaugsystems für den Materialabtransport	45
15S9425C	Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: Fachkundige Planungs- und Projektberatung zu den Anforderungen an ein mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung und deren Umsetzung sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	49
15S9429A	Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) Teilprojekt: Simulationsbasierte Werkzeugauslegung und Untersuchung des Einsatzverhaltens	52
15S9429B	Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie - Teilprojekt: Bindungs- und fertigungsspezifische Seilschleifwerkzeugentwicklung	55

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9429C	Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) - Teilprojekt: Einfluss der Verwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung auf die im industriellen Rückbau verwendete Maschinentechologie	59
15S9429D	Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifwerkzeuge mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) Teilprojekt: Anwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung im industriellen Rückbau.	62
15S9429E	Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) Teilprojekt: Auslegung und Herstellung neuartiger Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schneidstoffanordnung.	64
15S9430A	Verbundvorhaben: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogen- trennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: CAMG-Prozess	66
15S9430B	Verbundvorhaben: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogen- trennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: CAMG-Anwendung	70
15S9434A	Verbundvorhaben: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA); Teilvorhaben: Entwicklung von Werkzeugen zur In-Situ-Analyse von Betoneigenschaften, Radionukliden und hydraulischer Loch-zu-Loch-Permeabilität sowie Befundkartierung	73
15S9434B	Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus; Teilvorhaben: Analytik für die Beprobung von Beton	76
15S9434C	Gesamtvorhaben: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA); Teilvorhaben: Elektronische Ergebnisdokumentation, Beprobungsplanung und Wissensmanagement	77
<b>02.</b>	<b>Freigabeverfahren und konventionelle Entsorgungswege</b>	
15S9409A	Verbundprojekt: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenflussverteilungen Teilprojekt: Berechnung der Neutronenflussverteilung in reaktornahen Bauteilen und deren Validierung an Experimenten als Basis der Aktivitätsrechnungen	79
15S9409B	Verbundprojekt: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenflussverteilungen Teilprojekt: Entwicklung und Anwendung einer Rechenmethode zur genauen Bestimmung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau	82
15S9412	Wege zum effizienten Rückbau von Reaktorkomponenten und Betonabschirmung: Berechnung des Aktivitätsinventars und deren Validierung an Bohrkernen sowie Mobilitätsuntersuchungen von Radionukliden	86
15S9431A	Verbundvorhaben: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie TEILPROJEKT: Gerätebau und -entwicklung	89
15S9431B	Verbundvorhaben: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, Teilprojekt Bildrekonstruktionsverfahren	92

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9431C	Verbundvorhaben: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, Richtungsaufgelöster In-Situ-Gammaspektrometrie (QGRIS) TEILPROJEKT: Experimentelle Untersuchungen und Simulation	94
15S9431D	Verbundvorhaben: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie Teilprojekt: Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	100
<b>03.</b>	<b>Abfalldeklaration und Zwischenlagerung</b>	
15S9406A	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Entwicklung und Bau der Messanlage	103
15S9406B	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Methoden- und Softwareentwicklung	106
15S9406C	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Online-Messungen des Neutronenflusses	109
15S9411	Verbesserung der quantitativen Datenauswertung für die zerstörungsfreie Charakterisierung radioaktiver Behälter und Objekte	111
15S9420	Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebände (EMOS)	114
15S9422A	Verbundprojekt: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting, Teilprojekt: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahes Rückbauszenario	117
15S9422B	Verbundprojekt: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Ortsaufgelöste radiologische Charakterisierung zur Sortierung	120
15S9422C	Verbundprojekt: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	123
15S9432	Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines bildgebenden, zerstörungsfreien Analyse- und Deklarationsverfahrens für radioaktive Abfallgebände, basierend auf lasergetriebenen Neutronenquellen	127
<b>04.</b>	<b>Umwelt- und Strahlenschutz</b>	
15S9417	Umsetzung von Schwermetall-Landfarming zur nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Gewinnung erneuerbarer Energien auf radionuklidbelasteten Flächen: Optimierungsstrategien (USER-II)	130
<b>05.</b>	<b>Mensch und Organisation</b>	
15S9414A	Verbundvorhaben: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter der Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) Teilprojekt: Methodische Konzeptionierung	133
15S9414B	Verbundvorhaben: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter der Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) Teilprojekt: Benutzeroberfläche und Schnittstellen	136
15S9419	Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau (KernTrafo)	139
15S9426A	Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Kurztitel „Rückbaukompetenzen“)	144

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9426B	Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Kurztitel „Rückbaukompetenzen“)	147
<b>06.</b>	<b>Behandlung radioaktiver Abfälle</b>	
15S9407A	Verbundprojekt: Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit Teilprojekt: Entwicklung, Erprobung und Bewertung neuer Konditionierungsverfahren mit Nuklidseparation zur Volumenreduktion	149
15S9407B	Verbundprojekt: Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit Teilprojekt: Entwicklung und Erprobung von Verfahrensansätzen zur Vergasung von Reaktorgraphit für die optimale Abtrennung radioaktiver Kontaminationen	152
15S9410A	Verbundvorhaben: Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie Teilprojekt: Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen	155
15S9410B	Verbundvorhaben: Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie Teilprojekt: Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie	159
15S9413A	Verbundvorhaben: "Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen"; Teilprojekt: „Verfahrensentwicklung zur Dekontamination und Konditionierung der Prozessmedien einschließlich Gewinnung/Herstellung und Charakterisierung von Betonproben	162
15S9413B	Verbundvorhaben: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung von radioaktiv kontaminierten Zementstein mittels elektrohydraulischer Fragmentierung	165
15S9423A	Verbundprojekt: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: Durchführung der Versuche mit inaktivem Probenmaterial	167
15S9423B	Verbundprojekt: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: Durchführung von Versuchen mit radioaktivem Probenmaterial	169
15S9428A	Verbundprojekt: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) Teilprojekt: Projektkoordination sowie ökologische und radiologische Bewertungen	171
15S9428B	Verbundvorhaben: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) Teilprojekt: Entwicklung von Recyclingstrategien und Identifizierung von ökonomischen Verwertungswegen	174
15S9428C	Verbundvorhaben: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) Teilprojekt: Identifikation und Bereitstellung von Komponenten zur Untersuchung sowie Integration relevanter Ergebnisse zur Berücksichtigung im Rückbau	177
15S9428D	Verbundprojekt: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RetecKA) Teilprojekt: Ermittlung des intrinsischen Materialwerte	180

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9433A	Weiterentwicklung u. Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle mit C-14-Recycling auf Basis der elektrochemischer Totaloxidation; TP: Weiterentwicklung u. Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases	183
15S9433B	VP: Weiterentw. und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C-14-haltiger flüss. org. Abfälle TP: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C-14 Bestimmung mittels Flüssigszintillation und Untersuchungen zur Freimessung von C-14-Rückständen n. elektrochemischer Behandlung	185
15S9433C	VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle TP: Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C14	187

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9415A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilvorhaben: Entwicklung eines innovativen Schneidwerkzeug-Demonstrators und eines Prüfverfahren inkl. Prüfstand zur experimentellen Untersuchung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 886.209,60 € (inkl. Projektpauschale)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:sascha.gentes@kit.edu">sascha.gentes@kit.edu</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel im Verbundvorhaben „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH ist die Entwicklung einer innovativen und wettbewerbsfähigeren Rohrintrennvorrichtung mit großem Anwendungsspektrum im Hinblick auf Rohrdurchmesser, Wandstärke und Material. Zusätzlich zum reinen Trennen und Abtransportieren der Leitungen ist ebenfalls vorgesehen eine Möglichkeit für einen vorlaufenden Reinigungsvorgang zu entwickeln. Anfallende Späne oder andere Reststoffe sollen dabei kontinuierlich abgesaugt werden. Das System ist dabei so konzipiert, dass es nach einer Anwendung dekontaminiert werden kann, um es universell einsetzen zu können. Durch die hohe Flexibilität und die universelle Einsetzbarkeit können viele Arbeitsstunden für die Entwicklung und Konstruktion spezieller Einzellösungen eingespart werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Lastenheft und Prozessanalyse – Projektbegleitende Beratung
- AP1: Lastenheft und Prozessanalyse
- AP2: Aufbau eines Versuchstandes nach Bauplan
- AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebssystems
- AP4: Experimentelle Versuche (1. Versuchsreihe)
- AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines neuartigen Trägersystems
- AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)
- AP7: Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP8: Entwicklung und Konstruktion eines Werkzeug-Demonstrators
- AP9: Zusammenführung der Teilentwicklungen
- AP10: Analyse der Messungen, Bewertung und Optimierung/Verifikation und Zertifizierung mittels Praxisversuchen (3. Testreihe)
- AP11: Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP4: Experimentelle Versuchsreihe

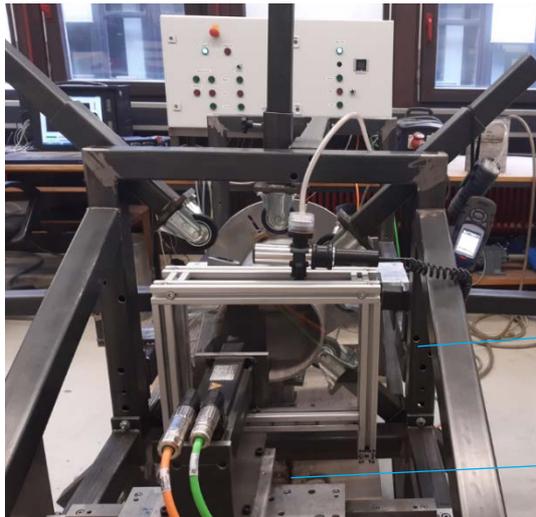
Im Rahmen von AP 4 wurden die experimentellen Versuchsreihen fortgesetzt. Die Versuchsreihen mit verschiedenen Sägeblättern und Scheibenfräsern (unterschiedliche Schneidwerkstoffe, beschichtete und unbeschichtete Ausführungen) wurden beendet. Die Analyse und Auswertung der Daten hat ergeben, dass die meisten der verschiedenen getesteten Ausführung zuverlässige und geeignete Trennwerkzeuge zur Rohrintrennung sind. Folglich können sowohl Scheibenfräser als auch Sägeblätter als Schneidwerkzeug in Betracht gezogen werden. Probleme ergeben sich teilweise bei der Schweißnaht. Da die Rohre unrund sind und fertigungstechnische Verformungen u.a. an der Schweißnaht erhalten, kann teilweise kein einheitlicher und durchgängiger Schnitt erzeugt werden. Somit ist es nicht möglich eine einheitliche Restwandstärke zu erhalten, um das Rohr abzdrehen.

Die erzeugten Kräfte während des Trennvorganges liegen bei beiden Trennwerkzeugen etwa im selben Bereich. Ein Scheibenfräser erzeugt Kräfte von 100-250N und ein Sägeblatt, je nach Beschichtung, von 100-300N. Während die Wärmeentwicklung am Schneidkopf bzw. am Trennwerkzeug bei Scheibenfräsern über 100 Grad beträgt, liegt diese bei Sägeblättern bei zwischen 50 und 100 Grad. Während des Schneidprozesses fallen bei beiden Werkzeugtypen Späne im Größenbereich von Millimetern an, was eine kontinuierliche Absaugung während des Schneidprozesses bei Sägeblättern und Scheibenfräsern notwendig werden lässt. Es können mit beiden Werkzeugen unterschiedliche Stähle getrennt werden.

Da es ohne weitere Sensorik nicht möglich ist die restliche Stärke des Rohres während des Schneidprozesses zu bestimmen, können einbetonierte Rohre mit dem aktuellen Prototyp nicht getrennt werden.

Nach der Beendigung dieser Versuchsreihen und der Lieferung eines neuen Motors mit deutlichen höheren Drehzahlen, wurde der Versuchstand für den Einsatz der Trennscheiben umgebaut. Der angepasste Versuchstand für Trennscheiben ist in nachfolgender Abbildung 1 zu sehen. Der Umbau und die Anbringung eines neuen Motors waren notwendig, da der Drehzahlbereich von Trennscheiben um eine Größenordnung über denen von Scheibenfräser und Sägeblatt liegen.

In die folgenden Versuchsreihen wurden Trennscheiben mit verschiedenen Körnungen (Keramik, Korund und Diamant) sowie mit unterschiedlichen Durchmessern (125 -180mm) an nahtlosen, geschweißten und einbetonierten Rohren untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mit Trennscheiben i.d.R. ein durchgängiger Schnitt, auch an den Schweißnähten, erzeugt werden können. Die Wärmeentwicklung ist im Vergleich zu Sägeblättern und Scheibenfräsern deutlich höher, die auftretenden Schnittkräfte während des Trennprozesses dahingegen deutlich geringer. Die während dem Schnittvorgang auftretende Staub- und Funkenbildung ist aufgrund dessen, dass der Schnitt sich im Rohr befindet, kontrollierbar. Nach Nachfrage beim TÜV, stellt der Funkenflug aus arbeitssicherheitstechnischen Gründen kein Problem in kerntechnischen Anlagen dar, solange ausreichende Sicherheitsmaßnahmen und Vorkehrungen getroffen werden. Da der Schneidprozess im Rohr stattfindet ist eine Abschirmung bereits vorhanden, lediglich eine kontinuierliche Absaugung müsste gewährleistet sein. Aufgrund der Aerosolbildung beim Schneidprozess müsste die Absaugung jedoch einen Filter besitzen. Der wesentliche Vorteil der Trennscheiben im Vergleich zu Sägeblättern und Schleifscheiben liegt jedoch darin, dass je nach Ausführung auch einbetonierte Rohre untersucht werden können.



**Unterschiede zu Versuchstand mit Scheibenfräser und Sägeblättern**

Staubmessgerät

Einhausung gegen Funken und Aerosole

Antriebsmotor mit bis zu 6.000 U/min

Damit ist die experimentelle Versuchsreihe (AP4) nun erfolgreich beendet.

Das Vorgehen der Versuchsreihen wie auch die Ergebnisse wurden im Oktober 2021 den Mitarbeitern von RWE in Mühlheim-Kärlich vorgestellt. Unser Projektpartner Siempelkamp hat bei der Vor-Ort-Besprechung die aktuelle Entwicklung des Prototypens vorgestellt. Beide Ergebnisse wurden mit großem Interesse aufgenommen und der Bedarf an einem Prototyp nochmals verdeutlicht.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)

Nach Fertigstellung des Demonstrator-Systems von NIS wird dieser am Versuchstand angebracht und dessen Funktionalität überprüft. Hierzu muss der Versuchstand umgebaut und eine Befestigung für den Demonstrator konstruiert und hergestellt werden. Die Umbauten sind u.a. notwendig, da der Prototyp aufgrund der Verspannung Probekörper von einer Länge von 1,5m benötigt. Aktuell ist der Versuchstand auf Rohre mit einer Länge von 0,5m ausgelegt.

Parallel hierzu läuft die weitere Versuchsplanung inklusive der Auswahl weiterer Frässscheiben und Sägeblätter für die Versuchsreihen mit dem Demonstrator. Nach der Überprüfung der Funktionalität des Prototypens werden ggf. weitere Versuchsreihen zur Optimierung des Prototypens erforderlich sein.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Auf der KONTEC (25.08. - 27.08.2021, Dresden) wurde zusammen mit unserem Kooperationspartner Siempelkamp ein Kurzvortrag zur Entwicklung des Rohrintrenners gehalten sowie ein dazugehöriges Paper veröffentlicht. Auf der DEM (13.09. - 15.09.2021, Avignon) und bei der safeND (10.11. - 12.11.2021, Berlin) wurde ein Poster zu den Versuchsreihen am KIT-TMB vorgestellt sowie je ein Full-Paper publiziert.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9415B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen. Teilvorhaben: Konzeptionierung, Herstellung und Erprobung eines neuartigen Befestigungs- und Trägersystems, der Zustelleinheit sowie des Antriebs des Rohrintrenners.	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 176.270,80 € (Anteilfinanzierung)
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Carmen Isabella Krau	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> carmen.krau@siempelkamp-nis.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel im Verbundvorhaben „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH ist die Entwicklung einer innovativen und wettbewerbsfähigeren Rohrintrennvorrichtung mit großem Anwendungsspektrum im Hinblick auf Rohrdurchmesser, Wandstärke und Material. Zusätzlich zum reinen Trennen und Abtransportieren der Leitungen ist ebenfalls vorgesehen eine Möglichkeit für einen vorlaufenden Reinigungsvorgang zu entwickeln. Anfallende Späne oder andere Reststoffe sollen dabei kontinuierlich abgesaugt werden.

Neben der Demontage schwer zugänglicher Rohrleitungen (beispielsweise einbetonierte, nicht auf voller Länge überbohrbare Leitungen) soll die Demontage sowohl an Luft als auch unter Wasser möglich sein. Zum flexiblen Einsatz soll die Bedienung manuell oder fernhantiert möglich sein. Auch das Einbringen in das zu trennende Rohr soll manuell oder fernhantiert erfolgen. Das System ist dabei so konzipiert, dass es nach einer Anwendung dekontaminiert werden kann, um es universell einsetzen zu können. Durch die hohe Flexibilität und die universelle Einsetzbarkeit können viele Arbeitsstunden für die Entwicklung und Konstruktion spezieller Einzellösungen eingespart werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Lastenheft und Prozessanalyse – Projektbegleitende Beratung
- AP1: Lastenheft und Prozessanalyse
- AP2: Aufbau eines Versuchstandes nach Bauplan
- AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebsystems
- AP4: Experimentelle Versuche (1. Versuchsreihe)
- AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines neuartigen Trägersystems
- AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)
- AP7: Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP8: Entwicklung und Konstruktion eines Werkzeug-Demonstrators
- AP9: Zusammenführung der Teilentwicklungen
- AP10: Analyse der Messungen, Bewertung und Optimierung/Verifikation und Zertifizierung mittels Praxisversuchen (3. Testreihe)

AP11: Dokumentation

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebssystems

Das AP3 wurde von NIS abgeschlossen. Die Funktionen des Spülens/ Absaugung wurden in der Konstruktion berücksichtigt. Die Funktion des Abscherens wird zu einem späteren Zeitpunkt betrachtet.

#### AP4: Experimentelle Versuchsreihe/

#### AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebssystems und Transportmittel der Leitungen

Parallel zu den Versuchen mit unterschiedlichen Schneidwerkzeugen wurde die Konstruktion des Prototyps angepasst. Der Prototyp wurde für die Frässscheibe und das Sägeblatt ausgelegt und konstruiert. Ein zweites System für die Verwendung der Trennscheibe ist notwendig.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebssystems und Transportmittel der Leitungen

Die Mittelfreigabe ist erfolgt. Die Norm- / Fertigungsteile des Prototyps (ausgelegt für Frässscheibe und Sägeblatt) wurden bestellt. Der Prototyp wird nach aktueller Planung Ende Q1/2022 bzw. Anfang Q2/2022 zusammengebaut.

Nach erfolgreicher praktischer Testreihe (AP 6) werden die noch ausstehenden Funktionen zum Abtransport der Leitung und der Absaugung diskutiert und ggf. konstruiert. Ziel ist außerdem die Optimierung und Validierung des entwickelten Teilsystems.

#### AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)

Nach Fertigstellung des Prototyps wird dieser am Versuchstand des KIT angebracht und dessen Funktionalität überprüft. Hierzu muss der bisherige Versuchstand umgebaut und eine Befestigung für den Demonstrator konstruiert und hergestellt werden.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Auf der diesjährigen KONTEC (25.08.-27.08.2021) wurde ein Kurzvortrag zur Entwicklung des Rohrintrenners gehalten und ein dazugehöriges Paper veröffentlicht.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31, 76131 Karlsruhe	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) Teilprojekt: Durchführung experimentelle Versuche und Auswertung an Versuchsmuster	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 541.108,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. S. Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an den restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort
- AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP 4: Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung

Die Funktionalität des Versuchsstandes/ der Messtechnik bei der Versuchsdurchführung an der Innenkante ist validiert. Für den dritten Prototyp mit mittlerer gegenläufiger Diamantscheibe und einem Antrieb ist die Beobachtung der Wärmeentwicklung während der Versuchsdurchführung notwendig, um die Gebrauchstauglichkeit des Getriebes zu überprüfen. Dafür sind ein aufklebbarer Pt100-Fühler und ein Temperaturregler von KIT-TMB bestellt, umgebaut und in Betrieb genommen.

#### AP 5: Entwicklung und Anfertigung des Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

KIT-TMB unterstützt die CONTEC GmbH und die HTWG bei den Umbauten des zweiten Prototyps mit gegenläufigen Diamantscheiben und zwei Antrieben für die Vergleichbarkeit der Messparameter zwischen zwei unterschiedlichen Drehkonzepten.

#### AP 6: Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster

Die neuen Probekörper mit höher Betonfestigkeit (C30/37) wurden in der Werkstatt des KIT-TMB geschalt und betoniert. Die Prüfung der Druckfestigkeit von den Probewürfeln ist bei der MPA Karlsruhe erfolgreich durchgeführt worden.

Die Prototypen ohne Absaugung und vollständiger Einhausung sind mit der Werkzeughalterung im Versuchsstand eingespannt, um die Prototypen nach verschiedenen Messparameter vergleichen zu können. Die Werkzeughalterung ist nach dem jeweilig einzuspannenden Prototyp angepasst.

#### AP 7: Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster

Die experimentelle Versuchsreihe (Beton C25/30) mit konventionellem Werkzeug (enviro Eckfräser C25), dem ersten Prototyp (gleichläufige Diamantscheiben und ein Antrieb), dem zweiten Prototyp (gegenläufige Diamantscheiben und zwei Antriebe) und dem dritten Prototyp (mittlere gegenläufige Diamantscheibe und ein Antrieb) ohne Absaugung und vollständiger Einhausung wurde mit unterschiedlichen Abtragstiefen und Vorschubgeschwindigkeiten auf der horizontalen Ebene erfolgreich durchgeführt. Die Versuche an der Innenkante sind auch durchgeführt, damit die Kraft- und Momentverteilung in der Praxis untersucht werden können. Die Abtragstiefen von 5, 10 und 15 mm und die Vorschubgeschwindigkeiten von 10, 15 und 20 mm/s sind vorab ausgewählt, um die Effizienz und Ergonomie der Prototypen zu untersuchen. Nach dem Versuch wurden Laservermessungen durchgeführt, um die Abtragsqualität zu vergleichen.

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB, CONTEC GmbH und SAT Kerntechnik GmbH optimieren die Versuchsmuster inklusive der Einhausung weiter und fertigen die Halterung für die Handbedienung der ersten und dritten Prototypen.

AP 6: Montage des umgebauten zweiten Prototyps mit gleichläufigen Diamantscheiben und zwei Antrieben im Versuchsstand

AP 7: Die weitere Durchführung der experimentellen Versuchsreihen und die Analyse der Versuchsergebnisse

AP 8: Die Planung für die Versuche vor Ort

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021 (Poster Präsentation)

Thema: Entwicklung neuer Technologien zur Dekontamination von Kanten und Störstellen

09/2021 DEM Symposium 2021 (Vortrag)

Thema: Development of a new machine for the decontamination of corners and inner edges on concrete surfaces

11/2021 safe<sup>ND</sup> Symposium 2021 (Poster Präsentation)

Thema: Development and testing of a tool for the decontamination of corners and inner edges on concrete surfaces

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hochschule Konstanz – Technik, Wirtschaft und Gestaltung HTWG, Labor für Produktentwicklung und Maschinenkonstruktion, Alfred-Wachtel-Str. 8, 78462 Konstanz	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) <i>Teilvorhaben:</i> Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 309.288,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Dr.sc.agr. Kurt Heppler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> kheppler@htwg-konstanz.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an den restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.10.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.04.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort

AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP5 Entwicklung und Anfertigung eines Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

Die Prototypen wurden im zweiten Halbjahr 2021 fertiggestellt. Sie sind somit am Prüfstand einsatzfähig und können weiterhin getestet werden (siehe AP7). In Bezug auf AP8 müssen die Prototypen für den Einsatz vor Ort (in kerntechnischen Einrichtungen) und vor allem für die Bedienung von Hand optimiert werden.

Diesbezüglich wurden erste Vorgespräche geführt und Ideen gesammelt (siehe 4. - Geplante Weiterarbeit).

#### AP6 Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster

AP 6 ist für den Prüfstandsbetrieb größtenteils abgeschlossen.

#### AP7 Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung des Versuchsmusters

HTWG unterstützt TMB bei der Versuchsdurchführung. Vor Ort wurden im zweiten Halbjahr 2021 der zweite und der dritte Prototyp getestet.

Beim zweiten Prototypen gab es einen Ausfall, welcher vor Ort mit der Firma Contec gemeinsam gesichtet wurde. Die Reparatur und Behebung der Schadensursache ist abgeschlossen (Weiterarbeit siehe Punkt 4).

Beim dritten Prototypen (GetriebeLösung) wurde für die Versuchsdurchführung ein Temperatursensor angebracht um die Ausdehnung der Getriebekomponenten zu überwachen (die Versuche aktuell werden ohne aktive Absaugung durchgeführt um die Staubemissionen vergleichbar ermitteln zu können; durch einen entsprechenden Luftstrom bei einer aktiven Absaugung erhoffen wir uns eine deutliche Kühlwirkung um die Verlustenergie, insbesondere Reibungswärme, abzuführen).

Die Funktionsweise des Getriebes (und der vierten Prototypen) wurde in Vorversuchen an der HTWG überprüft. Hierbei wurde das Getriebe komponentenweise verspannt und getestet. Anschließend wurden die offiziellen Versuche am KIT-TMB gefahren. Die bisherigen Ergebnisse der Prototypen sind vielversprechend.

#### AP8 Versuche vor Ort

Bezüglich der Versuche vor Ort wurden erste Gespräche mit der sat. Kerntechnik geführt, um den zeitlichen Horizont der Versuche abzustimmen.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Bezüglich AP5: Es werden teilweise Reparaturen an den Prototypen durchgeführt. In Zusammenarbeit mit Contec GmbH werden neue, ergonomische Gehäuse für die Handbedienung (mit Absaugung) von Prototyp 1 und 3 entworfen und gebaut. Diese dienen der Verwendung der Prototypen vor Ort (AP8).

Bezüglich AP7: HTWG führt weiterhin gemeinsam mit TMB vor Ort (KIT) die Versuche aus und analysiert die Daten. Insbesondere der zweite und die vierten Prototyp(en) werden weiterhin getestet. Im Anschluss an die Versuche ohne Absaugung wird eine Testreihe mit den neu gestalteten Gehäusen (AP5) durchgeführt, um die Staubemissionen unter Absaugung für die Versuche vor Ort zu bestimmen.

Bezüglich AP8: In Absprache mit der sat. Kerntechnik wird ein Zeitraum festgelegt, indem Versuche „vor Ort“ (kerntechnische Einrichtung zur Dekontamination) durchgeführt werden können. In diesem Zusammenhang werden Anforderungen an die eingesetzten Geräte besprochen und in den entsprechenden Arbeitspaketen konstruktiv umgesetzt.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

08/2021 KONTEC Symposium 2021

09/2021 DEM in Avignon

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CONTEC – Maschinenbau & Entwicklungstechnik GmbH, Hauptstraße 146, 57518 Alsdorf	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) Teilprojekt: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 191.250,05 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Johannes Greb	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> greb@contecgmbh.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an den restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.10.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.04.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort

AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### AP5 Entwicklung und Anfertigung eines Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

Die Prototypen wurden im zweiten Halbjahr 2021 fertiggestellt. Sie sind somit am Prüfstand einsatzfähig und können weiterhin getestet werden (siehe AP7). In Bezug auf AP8 müssen die Prototypen für den Einsatz vor Ort (in kerntechnischen Einrichtungen) und vor allem für die Bedienung von Hand optimiert werden.

Diesbezüglich wurden erste Vorgespräche geführt und Ideen gesammelt (siehe 4. - Geplante Weiterarbeit).

#### AP7 Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung des Versuchsmusters

Contec unterstützt TMB bei der Versuchsdurchführung. Vor Ort wurden im zweiten Halbjahr 2021 der zweite und der dritte Prototyp getestet.

Beim zweiten Prototypen gab es einen Ausfall, welcher vor Ort mit uns (Contec) gemeinsam gesichtet wurde. Die Reparatur und Behebung der Schadensursache ist abgeschlossen (Weiterarbeit siehe Punkt 4).

Beim dritten Prototypen (Getriebebelösung) wurde für die Versuchsdurchführung ein Temperatursensor angebracht um die Ausdehnung der Getriebekomponenten zu überwachen (die Versuche aktuell werden ohne aktive Absaugung durchgeführt um die Staubemissionen vergleichbar ermitteln zu können; durch einen entsprechenden Luftstrom bei einer aktiven Absaugung erhoffen wir uns eine deutliche Kühlwirkung um die Verlustenergie, insbesondere Reibungswärme, abzuführen).

Die Funktionsweise des Getriebes (und der vierten Prototypen) wurde in Vorversuchen an der HTWG überprüft. Hierbei wurde das Getriebe komponentenweise verspannt und getestet. Anschließend wurden die offiziellen Versuche am KIT-TMB mit unserer Mitwirkung (Contec) gefahren. Die bisherigen Ergebnisse der Prototypen sind vielversprechend.

#### AP8 Versuche vor Ort

Bezüglich der Versuche vor Ort wurden erste Gespräche mit der sat. Kerntechnik geführt, um den zeitlichen Horizont der Versuche abzustimmen.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Bezüglich AP5: Es werden teilweise Reparaturen an den Prototypen durchgeführt. Wir bauen neue, ergonomische Gehäuse für die Handbedienung (mit Absaugung) von Prototyp 1 und 3. Diese dienen der Verwendung der Prototypen vor Ort (AP8).

Bezüglich AP7: Insbesondere der zweite und die vierten Prototyp(en) werden weiterhin getestet. Im Anschluss an die Versuche ohne Absaugung wird eine Testreihe mit den neu gestalteten Gehäusen (AP5) durchgeführt, um die Staubemissionen unter Absaugung für die Versuche vor Ort zu bestimmen.

Bezüglich AP8: In Absprache mit der sat. Kerntechnik wird ein Zeitraum festgelegt, indem Versuche „vor Ort“ (kerntechnische Einrichtung zur Dekontamination) durchgeführt werden können. In diesem Zusammenhang werden Anforderungen an die eingesetzten Geräte besprochen und in den entsprechenden Arbeitspaketen konstruktiv umgesetzt.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

08/2021 KONTEC Symposium 2021  
09/2021 DEM in Avignon

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> SAT Kerntechnik GmbH Vangionenstrasse 15, 67547 Worms	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) Teilprojekt: Praxisversuche und Verifizierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 541.108,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stefan Stemmler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stemmler@sat-kerntechnik.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an den restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort
- AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

- Abstimmungen mit der Firma Contec, dem KIT und der HTWG (AP4-7)
  - Austausch von Informationen, Dokumenten und Ideen
  - Zuarbeit zu Berichten und Veröffentlichungen
  - Beratungsleistungen für andere Projektteilnehmer
- Besuch der Messe Icond in Aachen im Oktober 2021 (Vorbereitung AP8)
- Fortführung des Rückbauprojektes im Kernkraftwerk Obrigheim (Vorbereitung AP8)
- GdF (Gebäudedekontamination und Freigabe). Abfräsen bzw. Abstemmen von Dekontanstrich, Estrich und von mineralischen Strukturen an Decken, Böden, Wänden und Unterzügen.
- Test handelsüblicher Maschinen bezüglich Tauglichkeit für Eckendekontamination, als Benchmark für die Praxisversuche der Prototypen
- Test der Maschine „MKI HF-80BL Brushless“
- Kriterien waren/sind u.a. Ergonomie, Fräsleistung, Preis, Standzeit, Tauglichkeit für Ecken
- Austausch zwischen Projektleiter und -mitarbeitern im Büro Worms und auf den Baustellen.
- Die Erkenntnisse fließen in die anstehende Testphase der Prototypen ein
- Lieferantenbesuche-/Gespräche
- Hausmesse MKI in Frankenthal im Oktober 2021
- Fräsmaschinen mit bürstenlosem Antrieb (Benchmark für Prototypen)

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Unterstützung bei den nachfolgend aufgeführten Aktivitäten.

Fortführung der Praxisversuche (Vorbereitung AP8) im KWO mit dem Ziel, möglichst schnell den Transfer der Prototypen vom Versuchsstand auf echte Dekont-Baustellen zu starten.

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB, CONTEC GmbH und SAT Kerntechnik GmbH optimieren die Versuchsmuster inklusive der Einhausung weiter und fertigen die Halterung für die Handbedienung der ersten und dritten Prototypen.

AP 6: Montage des umgebauten zweiten Prototyps mit gleichläufigen Diamantscheiben und zwei Antrieben im Versuchsstand

AP 7: Die weitere Durchführung der experimentellen Versuchsreihen und die Analyse der Versuchsergebnisse

AP 8: Die Planung für die Versuche vor Ort

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021 (Poster Präsentation)

Thema: Entwicklung neuer Technologien zur Dekontamination von Kanten und Störstellen

09/2021 DEM Symposium 2021 (Vortrag)

Thema: Development of a new machine for the decontamination of corners and inner edges on concrete surfaces

11/2021 safe<sup>ND</sup> Symposium 2021 (Poster Präsentation)

Thema: Development and testing of a tool for the decontamination of corners and inner edges on concrete surfaces

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9418A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt LaDECO: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau Teilprojekt: Ermittlung von Sekundäremissionen bei der laserbasierten Dekontamination und Praxiserprobung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 816.489,05 €
<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Antonio Hurtado	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Antonio.Hurtado@tu-dresden.de

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt LaDECO sollen umfassende Erkenntnisse zu noch offenen Fragestellungen der laserbasierten Dekontamination gewonnen werden, um damit die Kenntnisse zur Prozesssicherheit zu vertiefen und praxistaugliche Verfahren zur Prozesskontrolle zu entwickeln.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Projektarbeit liegt in der Charakterisierung der entstehenden Sekundäremissionen (Partikel und Gase). In den bisherigen Untersuchungen wurde eine intensive Partikelentstehung während der Laserabtragsprozesse beobachtet. Da diese Partikel - prozessparameterabhängig- nanoskalig und damit lungengängig sind, soll der Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Partikeleigenschaften aufgeklärt werden. Die Arbeiten sollen in einer Modellentwicklung für die Partikelentstehung in Laserabtragsprozessen münden. Darauf soll die sicherheitstechnische Bewertung der Partikelentstehung aufbauen, die eine Auswahl von Systemen zur höchstmöglichen Rückhaltung der Partikel ermöglicht.

Ein weiterer wesentlicher Schwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung des Verfahrens der Dekontamination von metallischen Oberflächen. Entsprechend den in kerntechnischen Anlagen real existierenden Gegebenheiten und in Anlehnung an dort tatsächlich gemessene Nuklidvektoren werden diese Oberflächenvarianten definiert kontaminiert und der Dekontaminationsfaktor nach Laserabtrag anhand radiologischer Messungen ermittelt und optimiert.

Zur Absicherung des Einsatzvermögens von Lasertechnik unter stark radioaktiven Bedingungen werden in Kooperation mit Fraunhofer INT die optischen Komponenten in Langzeitversuchen hohen Strahldosen ausgesetzt und online die Dämpfung der Optiken ermittelt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

TUD-1:	Entwicklung und Aufbau eines Teststandes zur Untersuchung der Partikelentstehung, Status: abgeschlossen		
TUD-2:	Charakterisierung der freigesetzten Partikel und Auswahl von Systemen zur Rückhaltung, Status: in Bearbeitung		
TUD-3:	Durchführung von Versuchen auf radiologisch kontaminierten Oberflächen, Status: in Bearbeitung		
TUD-4:	Ausschluss der Schädigung optischer Komponenten durch radioaktive Strahlung, Status: abgeschlossen		
TUD-9	Erstellung	des	Abschlussberichtes, Status: nicht begonnen

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

**TUD-2:** Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde die Bestimmung der Freisetzung von Partikeln für verschiedene Beschichtungen und für die Grundmaterialien mit dem gepulsten Diodenlaser CL150 abgeschlossen. Neben der Leistungsvariation des Lasers wurde der Einfluss der Pulsfolgefrequenz, der Scanfrequenz und Scanbreite untersucht. Parallel erfolgte die Beprobung der freigesetzten Partikel.

**TUD-3:** Die Vorversuche zur Ermittlung von Parametersätzen für die Bearbeitung von blanken Metallen waren bereits abgeschlossen. Sie wurden ergänzt durch Untersuchungen zum Abtrag von verzinkten, oxidierten und mit Lack beschichteten Stahloberflächen. Als Resultat liegen Parametersätze zum Abtrag der verschiedenen Oberflächen vor, die in Abhängigkeit der Anzahl der Wiederholungen Aussagen zur Abtragtiefe zulassen. Die Vorversuche sind damit abgeschlossen.

In einer eigens für die Versuche hergestellten Abtragbox zum Transport der Proben in das Radionuklidlabor wurde mit Untersuchungen zur Dekontamination von mit Co-60 beaufschlagten Proben begonnen. Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass die Auswahl der Filter einen 100 %igen Rückhalt des Nuklids gewährleistet. Nach derzeitigem Stand werden 90 % der Radioaktivität auf der Probe im Filter nachgewiesen. Spuren lassen sich auf dem Transportweg zum Filter finden. Restaktivität auf der Probe zu entfernen ist Inhalt derzeitiger Untersuchungen.

Zur Vorbereitung der Verfahrensdemonstration an der KTE wurden die Räumlichkeiten vor Ort gesichtet und Pläne zur Installation der Technik entwickelt. Schulungen zu Brandschutz, Arbeitsschutz und Strahlenschutz wurden absolviert. Die Prüfungen stehen noch aus. Der Austausch mit dem TÜV zur Genehmigung der Tätigkeiten im Kontrollbereich ist in Arbeit.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

**TUD-1:** keine

**TUD-2:** Nach dem Abschluss der Untersuchungen mit dem gepulsten Lasersystem, werden nun die Untersuchungen für den (cw) Diodenlaser durchgeführt.

**TUD-3:** In enger Zusammenarbeit mit dem Radionuklidlabor der TU Dresden wird die Dekontamination der 5 verschiedenen Oberflächenarten von Co-60 intensiv fortgeführt und umfassend untersucht. Im Anschluss sollen diese Ergebnisse auf die Dekontamination von Cs 137, Am-241 und Sr 85 ausgeweitet werden.

Parallel sind die Vor-Ort-Versuche in der KTE weiterhin in Vorbereitung.

**TUD-4:** Keine

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

-

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Vortrag:

„Methode zur Validierung der Aerosolfreisetzung bei laserbasierter Dekontamination“  
Torsten Kahl, Veranstaltung: Kraftwerkstechnisches Kolloquium und Kerntechnisches Symposium, 06.10.2021, Dresden

Poster:

„Einfluss von Gammastrahlung auf optische Komponenten beim Laserdekontaminieren“  
Anne-Maria Reinecke, Veranstaltung: 16. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“ einschließlich 16. Statusbericht des BMBF „Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen“ 25.-27.8.2021

Publikation:

T. Kahl, F. Lohse, M. Herrmann, A. Hurtado, Evaluation of particle release during cleaning of coated surfaces with pulsed Nd:YAG laser, eingereicht beim Beilstein Journal of Nanotechnology

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9418B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminierungstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDECO) Teilvorhaben: Untersuchungen zur thermischen Zersetzung, zum Partikeltransport und zur Lackdetektion auf Betonoberflächen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 617.234,40 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt LaDECO sollen umfassende Erkenntnisse zu noch offenen Fragestellungen der laserbasierten Dekontamination gegeben werden, um damit die Kenntnisse zur Prozesssicherheit zu vertiefen und praxistaugliche Verfahren zur Prozesskontrolle zu entwickeln.

Schwerpunkt der Arbeiten an der TU Bergakademie Freiberg sind die detaillierte Untersuchung und Optimierung der Verbrennung der PCB-haltigen Lackschichten sowie die Entwicklung eines online-Monitoring-Verfahrens für die Überwachung der Verbrennung und die Überprüfung des Lackabtrags von Betonoberflächen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Verbrennung der Lackschichten ist das Schadstoffemissionspotenzial und dessen Zusammenhang mit der Temperatur- und der Verbrennungsmittelzuführung zu bestimmen. Darauf aufbauend soll ein Modell zur thermischen Umsetzung des Lackes und der Partikelentstehung während des Dekontaminationsprozesses erstellt werden, welches als Grundlage für die sicherheitstechnische Bewertung und die Auswahl geeigneter Filtersysteme dient. Diese Untersuchungen werden durch numerische Simulationen unterstützt. Zur Überwachung der vollständigen Verbrennung ist ein online-Monitoring-Verfahren zu entwickeln und in das Dekontaminationssystem zu integrieren. Neben der Verbrennungsüberwachung ist ein bildgebendes Verfahren zu entwickeln, welches die Vollständigkeit des Lackabtrages auf Betonoberflächen nach der Laser-Dekontamination überwachen kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 5: Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von Lacken mittels berührungsloser Analytik (Status: in Bearbeitung)

AP 6: Numerische Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von Lacken und zum Partikeltransport (Status: in Bearbeitung)

AP 7: Konzeptionierung und Entwicklung eines Detektionssystems zur Identifizierung von Lackschichten auf Betonflächen (Status: abgeschlossen)

AP 8: Untersuchung zur Nachweisbarkeit von Lackschichten und -resten auf Betonflächen (Status: in Bearbeitung)

AP 9: Erstellung des Abschlussberichts (Status: planmäßig noch nicht begonnen)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

**AP 5:** Die Inbetriebnahme des Versuchsstandes konnte abgeschlossen werden und die ersten Vorversuche wurden durchgeführt. Die Auswertung dieser Vorversuche und die daraus folgende Versuchsplanung werden derzeit durchgeführt. Aufbauend auf dieser Planung wurde die Beschaffung neuer Proben eingeleitet. Eine zweite Messkampagne zur Untersuchung des Metallarbeitskopfes und des Laserabtragsprozesses mittels gepulstem Laser wurde in Zusammenarbeit mit der TU Dresden durchgeführt und die Auswertung wurde begonnen. Die Durchführung einer dritten und vierten Messkampagne wurde geplant und vorbereitet.

**AP 6:** Die Ergebnisse der Simulation des Betonarbeitskopfes wurden ausgewertet und interpretiert. Die Anpassung der Parameter des Metallarbeitskopfes wurde durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls ausgewertet und interpretiert. Weiterhin wurden Berechnungen zur qualitativen Bewertung der möglichen Reaktionen durchgeführt. Hierbei wurde eine Erwärmung von Biphenylmethan auf 1000 °C für unterschiedliche Aufheizraten betrachtet.

**AP 8:** Die Vermessung der Betonproben wurde abgeschlossen. Aufbauend auf dem Feedback des 4. Projekttreffens in Karlsruhe wurde ein Teil des Messaufbaues nochmal überarbeitet und die Datengrundlage wurde um zwei weitere IR-Strahlungsquellen erweitert. Mit der Auswertung der Daten wurde begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

**AP 5:** Nach der Auswertung der Vorversuche des Versuchsstandes sollen systematische Untersuchungen zur Charakterisierung der thermischen Zersetzung der Lacke durchgeführt werden. Im Januar und Februar 2022 sollen zwei Messkampagnen in Zusammenarbeit mit der TU Dresden durchgeführt werden, um die thermische Zersetzung der Lacke im realen Laserprozess zu untersuchen. Dabei wird zum einen der Diodenlaser betrachtet und zum anderen werden die Ergebnisse hinsichtlich des gepulsten Lasers validiert.

**AP 6:** Aus den Ergebnissen der durchgeführten Messkampagne mit dem Betonkopf ergibt sich eine notwendige erneute Anpassung der Simulationsparameter. Zum Vergleich der Temperaturwerte müssen weiterhin die Thermoelemente als Auswertepunkte in das Modell implementiert werden. Für die chemische Betrachtung sollen mehrere Szenarien untersucht werden, um das Bild für mögliche Reaktionspfade zu vervollständigen. Hierbei wird zunächst eine Abschätzung der erreichbaren lokalen Temperaturen, sowie des involvierten Volumens benötigt. Mögliche Reaktionspfade können dann durch die Simulation der chemischen Reaktion für verschiedene Temperatur-Zeit Profile ermittelt werden.

**AP 8:** Die vorhandenen Daten werden ausgewertet und visualisiert. Ziel dieser Auswertung ist die Erstellung eines Modells zur Beurteilung der Probenoberfläche. Gegebenenfalls sollen noch Untersuchungen und Daten, welche aus den Proben der Versuche mit dem Diodenlaser resultieren, mit in dieses Modell einbezogen werden.

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge:

- KONTEC 2021

Pestel, A.; Flößner, T.; Krause, H. (2021). LaDECO - Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau an der TU Bergakademie Freiberg, Konferenz-Poster (DOI: 10.13140/RG.2.2.13327.10405)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9421A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH, Huyssenallee 2, 45128 Essen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kernkraftwerken Teilvorhaben: Verfahrenstechnik und Engineering	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2020 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 256.953,75 €
<b>Projektleiter:</b> Herr Jörg Recknagel	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Joerg.Recknagel@kkw.rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

### Gesamtzielsetzung des Verbundes:

Ziel des Projekts ist, erstmals eine automatisierte und autonome Abtragung der Beschichtung von Bauteilgruppen mittels UHD-Wasserstrahltechnik beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu realisieren und im KKW Biblis im industriellen, produktiven Maßstab einzusetzen. Die Bauteilgeometrien sind höchst unterschiedlich und überwiegend nicht durch geometrische Primitive beschreibbar. Es werden zwei Prototypanlagen gebaut, zunächst ein Prototyp im Labormaßstab aus dem anschließend in mehreren Evaluierungsrunden ein Prototyp in Industriequalität entwickelt wird.

### Teilprojekt RWE:

RWE entwickelt und plant die technische Umsetzung für die gemeinsam mit dem Projektpartner (Fachinstitut: Fraunhofer Institut IGD in Darmstadt) zu entwickelnde Roboter-gestützte Automatisierungslösung, unterstützt die Entwicklung CE-konformer industrietauglicher Komponenten und integriert diese in die vorhandene Infrastruktur. Die Arbeitspakete werden dabei in enger Zusammenarbeit unter stetiger Evaluierung der Ergebnisse mit dem IGD bearbeitet.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in acht Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 - Anforderungen/Systemdesign

AP2 - Autonome 3D-Erfassung der Oberflächengeometrie

AP3 - Robotergestützte Entschichtung

AP4 - Simulation und Integration

AP5 - Prototypenbau

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP6 - Anlagenimplementierung

Implementierung des Prototyp2 in den Kontrollbereich des KWB

AP7 - Evaluierung

AP8 - Projektmanagement

RWE Nuclear GmbH ist Projektkoordinator und im 2. Halbjahr an den AP3, AP5, AP7 und AP8 beteiligt. AP1 wurde im ersten Halbjahr 2021 abgeschlossen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### AP3: robotergestützte Entschichtung

- Durchführung von Roboter-Simulationen zur Beurteilung der erforderlichen kinematischen Bewegungsfreiheit für den Roboter im Hinblick auf die Anbringung der UHD-Verschlauchung.

#### AP5 Prototypenbau RWE

- Planung und Beschaffung einer Simulations-SPS für den Aufbau RWE01, welche die Signale von RWE02 weitgehend simuliert
- Schnittstellenabstimmung und Signalbelegung der Steuerungen zwischen der Roboter-Anlage, der übergeordneten Dekontraumsteuerung sowie der Prozessrechentechnik
- Bewertung des Not-Aus Konzepts und Abstimmung der Umsetzung
- IBS der modularen Roboteranlage beim Anlagenbauer
- Erarbeitung technischer Vorschläge zur Änderung/Optimierung des Schutzschlauchsystems am Roboter.
- Optimierung der UHD-Wassereinspeisung in den Endeffektor und der Wasserzufuhr und Kupplung
- Optimierung des Sperrluft-Kühlsystems. Optimierung der Luftdurchströmung
- Optimierung der Führung der Roboterverschlauchung zum Endeffektor und zum Robotersockel unter Berücksichtigung der Roboterkinematik
- Technische Abstimmung der Übergabeschnittstellen für die Medienleitungen
- Ausarbeitung des technischen Konzepts für den Fernzugriff
- Vereinfachung der Anlagensteuerung über vier Drucktaster
- Vorbereitung am Standort Biblis für die Aufstellung der Anlage in der Waschhalle
- Elektrotechnische Vorabnahme, IBS und allg. Vorabnahme der Anlage beim Hersteller
- Anlieferung und Aufbau des industriellen Prototyps RWE01 auf dem RWE Werksgelände in Biblis
- Unterstützung bei finalen Baumaßnahmen und Kabelzugarbeiten vor Ort.
- Einrichtung der Programmier- und Überwachungsarbeitsplätze, hardware- und softwaretechnische Ausstattung
- Einrichtung und Tests der Sicherheitsfunktionen, IBS der Anlage, Testablauf des Basisprozesses
- Endabnahme der Anlage

#### AP6: Anlagenimplementierung

- Informationsveranstaltung der an den Maßnahmen beteiligten Fachbereiche (am Standort)
- Planung der Medienanschlüsse der Roboteranlage in der Dekontbox
- Veranlassung vorbereitende Arbeiten für den Aufbau RWE 01
- Abstimmung des Steuerungs- und Not-Halt-Konzepts
- Planung und Beschaffung der Komponenten für die Fernwartung und Kameraüberwachung

#### AP7: Evaluierung

- Evaluierungsrunde für das Online-Zugriffs-Konzept und die Fernwartungs-Module
- Evaluierung von zwei unterschiedlichen Systemen zur Roboter-Schlauchführung (Balancer versus Führung entlang des Roboter-Gliederarms)
- Evaluierung des Kühlkonzepts für den Endeffektor

AP:8 Projektsteuerung/Administrative Projektarbeit

- Projektcontrolling -inhaltlich/kostenseitig. Vereinbarung weiterer verbindlicher Projektziele/ Meilensteine zwischen den Projektpartnern sowie Erstellung von Lasten- und Pflichtenheften und die Beauftragung von Lieferanten
- Einbindung und Koordination der Leistungen (Planung, Fertigung) und Lieferungen des Systemintegrators und Anlagenbauers
- Einbeziehung der beteiligten Fachwerkstätten am Standort Biblis, der Arbeitssicherheit und der Berufsgenossenschaft
- Fortschreibung Projektterminplan, Master-Memoliste und Projektdokumentation
- Durchführung von zahlreichen Projektmeetings der Projektpartner
- Teilnahme an 1-2 wöchentlichen Fachgesprächen mit Herstellern und Lieferanten (überwiegend Online Meetings). 3 mehrtägige Präsenztermine
- Berichtswesen extern für den Projektträger, intern für die Geschäftsführung
- Quartalsweise Abrechnung gegenüber dem Projektträger
- Bewertung der aktuellen Projekteinflüsse Lieferkettenverzögerungen und Pandemie auf Termin und Kosten
- Steuerung und Abstimmung der IBS Phase beim Anlagenbauer
- Vorbereitung Aufbau RWE 01
- Erfassung sich ergebender Terminverschiebungen- und Kostenänderungen, Mitteilung an den Projektträger, Einreichung eines Änderungsantrags

**4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP1: AP1 ist abgeschlossen.

AP3: Die numerische Ableitung der Wirkparameter mit feinerer Granulation der Stützpunkte wird während der Testphase im Nassbetrieb fortgeführt und es wird angestrebt, eine interaktive Bedienoberfläche zu ergänzen

AP5: Der Fokus liegt zunächst auf der erfolgreichen Durchführung des Testbetriebs RWE01, d.h. auf der damit verbundenen sukzessiven Einrichtung des Betriebs unter Realbedingungen von der Bauteilgeometrieerkennung bis zum Abfahren der Reinigungsbahnen unter Berücksichtigung der physikalischen Wirkparameter. Ab Anfang März soll die UHD Wasserstrahltechnik angeschlossen und damit das Gesamtsystem im Nassbetrieb fahren und umfangreich getestet werden. Der weitere Ablauf wird konkret von den Ergebnissen der Testphase abhängen, die planmäßig in der ersten Aprilwoche beendet wird. Im weiteren Ablauf wird ferner an der Fertigstellung aller Maßnahmen gearbeitet, die zur Integration der Anlage in die vorhandene Infrastruktur des Kontrollraums erforderlich sind. Insbesondere betrifft dies hardwaretechnische Schnittstellen der Medienleitungen und der Elektroversorgung aber auch die programmiertechnischen Schnittstellen zur Dekonraumsteuerung, in die sich die Schaltlogik der Roboteranlage nahtlos integrieren muss. Zur Vorbereitung dient eine moderne S7 Simatic-Steuerung, mit der sich die wichtigsten Signalübertragungen bereits simulieren lassen. Ferner wird die Erweiterung der Funktionalität der Anlage um ein Intensiv-Nachreinigungsprogramm konzipiert.

AP6: Die Vorplanungen für die Anlagenimplementierung werden finalisiert und es werden vorbereitende Tätigkeiten in den betroffenen Anlagenräumen des Kontrollbereichs durchgeführt

AP7, AP8: Ermittlung von Optimierungspotenzial, Koordinierung und Controlling der Leistungen des Forschungspartners sowie des Anlagenbauers und des Systemintegrators

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine neuen Erkenntnisse

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9421B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200733, 800007 München, für ihr Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kraftwerken Teilvorhaben: Autonome Digitalisierung und Entschichtung von Baugruppen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2020 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.170.790,66 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Herr Pedro Santos	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> pedro.santos@igd.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

### Gesamtzielsetzung des Verbundes:

Ziel des Projekts ist, erstmals eine automatisierte und autonome Abtragung der Beschichtung von Bauteilgruppen mittels UHD-Wasserstrahltechnik beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu realisieren und im KKW Biblis im industriellen, produktiven Maßstab einzusetzen. Die Bauteilgeometrien sind höchst unterschiedlich und überwiegend nicht durch geometrische Primitive beschreibbar. Es werden zwei Prototypanlagen gebaut, zunächst ein Prototyp im Labormaßstab aus dem anschließend in mehreren Evaluierungsrunden ein Prototyp in Industriequalität entwickelt wird.

### Teilprojekt IGD:

Das Fraunhofer IGD entwickelt die notwendige autonome Roboter-gestützte 3D-Digitalisierung beliebiger Objektoberflächen, sowie die Bahnplanung für einen mit UHD-Wasserstrahltechnik ausgestatteten Entschichtungsroboter unter Berücksichtigung der Strahldüsen-Wirkparameter und Störgeometrien.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in acht Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 - Anforderungen/Systemdesign

AP2 - Autonome 3D-Erfassung der Oberflächengeometrie

AP3 - Robotergestützte Entschichtung

AP4 - Simulation und Integration

AP5 - Prototypenbau

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP6 - Anlagenimplementierung

Implementierung des Prototyp2 in den Kontrollbereich des KWB

AP7 - Evaluierung

AP8 - Projektmanagement

Das Fraunhofer IGD ist an AP1-AP7 beteiligt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

#### AP1: Anforderungen/Systemdesign

- Dieses AP wurde im letzten Jahr ausgeführt. Übriggeblieben sind kleinere Systementscheidungen, die mit der endgültigen Konfiguration der Demonstratoren zusammenhängen und in den jeweiligen APs durchgeführt werden.

#### AP2: Autonome 3D-Erfassung

Ziel: Erfassung eines unbekanntes teilweise glänzenden Objektes. Der Fokus lag im zweiten Halbjahr auf der Übertragung und Anpassung der bisherigen Ergebnisse von IGD01 auf den im zweiten Halbjahr entstehenden Industrie-Prototypen RWE01 und dessen damit verbundenen recht unterschiedlichen und wesentlich umfangreicheren Architektur im Vergleich zum Laborprototypen IGD01.

Schwerpunkte waren hierbei folgende Tätigkeiten:

- Anpassung der bestehenden IGD01 Scanner-Software an die für RWE01 notwendigen Schnittstellen und in AP4 entwickelte neue Steuerungssoftware des Roboter-Systems.
- Modularisierung der Steuerungssoftware um beide Roboter-Systeme (IGD01 und RWE01) zu unterstützen.
- Seit Bestehen des realen RWE01 Demonstrators, Anpassungen an den physikalischen Prototypen, Weiterentwicklung und Optimierung mit dem Ziel der Oberflächenerfassung bei voller Fahrt.

#### AP3: robotergestützte Entschichtung

Ziel: Reinigung auf Basis von direkt auf Punktwolken erfolgreicher Pfadplanung. Der Fokus im 2. Halbjahr lag in der Adaption des Reinigungsprozesses und dessen Bahnplanung auf Basis des Standes des IGD01-Demonstrator auf dem in diesem Halbjahr entwickelten RWE01-Demonstrator.

Schwerpunkte waren hierbei folgende Tätigkeiten:

- Nach „proof-of-concept“, Umsetzung der Verfahren zur Bahnplanung mittels Voxel- und Höhenfeldern für implizite Selbstkollisionsberücksichtigung und Anpassung an das System des RWE01 Prototypen. Dies war der primäre Schwerpunkt dieses Halbjahres, da eine Kollision des Prototypen mit dem zu bearbeitenden Bauteil vermieden werden soll. Wie weit Simulation und die Realität voneinander entfernt sind, wird aktuell eingemessen, um das System präzise zu kalibrieren.
- Automatische Segmentierung des Scans in zu reinigende und nicht zu reinigende (Haltevorrichtung, bereits gereinigte) Geometriebereiche liefert inzwischen eine zuverlässige Segmentierung für die Plausibilitätsüberprüfung ob freistehenden Geometriebereichen durch optische Störungen (Blendungen / Reflektionen) entstanden sind, oder zum Modell gehören.

#### AP4: Steuerung, Simulation, Integration

Ziel: Entwicklung einer virtuellen Reinigung zur Bahnoptimierung, in diesem Halbjahr aber speziell die Steuerung des Gesamtsystems.

Der Schwerpunkt im zweiten Halbjahr 2020 lag hier in der Entwicklung der Steuerung des neuen Prototypen:

- Die Entwicklung der Softwarekomponente des RWE01 Roboter-Systems erstreckte sich zuerst auf den dazu passenden Simulator des Roboter-Herstellers (Stäubli), später direkt auf und am RWE01.
- Hierbei gab es zwei getrennte Entwicklungsbereiche:
  - Die Steuerung des Echtzeit-Linienlaserscanners, Auswertung der Bilddaten, darauf basierende Rekonstruktion der 3D-Geometrie für den Scanprozess, sowie auf der errechneten Geometrie adaptiv generierte Reinigungstrajektorien für den Reinigungsprozess, und die übergeordnete Prozesslogik (Einbettung in Bedienkonzept und Realisierung der Anwender-gewählten Modi Standard-Scan&Reinigung, Umspannen, sowie Nachreinigen) stellt den einen Bereich dar, und wird auf dem IPC (Prozessrechner) ausgeführt. Die Steuerung des Roboters, des Drehtellers, der Hochdruck-Reinigungsanlage, sowie der Schutzklappe des Laserscanners beschränkt sich dabei auf ein eigens definiertes Kommunikations-Protokoll zwischen dem Stäubli Roboter und dieser Softwarekomponente.
  - Zusätzlich gibt es eine auf dem Roboter von Stäubli ausgeführte Software. Diese stellt den zweiten Entwicklungsbereich dar. Ihre Aufgabe ist es, eine Schnittstelle zur Steuerung der erforderlichen Funktionen bereitzustellen, die mittels eines speziellen Protokolls von der Software auf dem IPC bedient wird. Neben der direkten Ansteuerung der einzelnen Gelenke des Roboters in der Stäubli-Programmiersprache VAL3 fungiert sie ebenfalls als Bindeglied und Abstraktion der übrigen Systeme wie dem Drehteller, der Hochdruck-Reinigungsanlage, und der SPS, die den Zugriff auf den Status und die Steuerung der Gesamtanlage ermöglicht.
- Die Teile aus AP3 und AP4 bilden hierbei weiterhin ein System bestehend aus Planung und Simulation, dass in mehreren Durchläufen optimiert werden kann. Die Arbeiten an der Gesamtkommunikation waren in diesem Fall allerdings auch für AP2 relevant, da diese das Grundgerüst für das gesamte übergreifende System darstellen.
- Ziel der Entwicklung und Implementierung von Protokollen zur Ansteuerung der erforderlichen Schnittstellen für RWE01 war eine Abstraktion des Prototypen zu erreichen. Dies erlaubt in einem gewissen Rahmen den Austausch der Software zwischen IGD01 und RWE01. Ziel hiervon ist die Reduktion von vor der Pandemie generierten Projektrisiken, da hierdurch ein zweiter ähnlicher Prototyp existiert, der zur Entwicklung der komplexeren Funktionen speziell aus AP2 & 3 verwendet werden kann.

#### AP5: Prototypenbau RWE

Das zweite Halbjahr 2021 stand ganz im Zeichen der Umsetzung und Testung des RWE01 Demonstrators zuerst am Simulator, dann beim Maschinenbauer und gegen Ende des Jahres in Biblis. Die Abnahmen der Funktionen des Systems beim Maschinenbauer und bei Biblis waren erfolgreich. Zu den im ersten Halbjahr beschriebenen Arbeiten kam hier Feedback aus den Tätigkeiten von AP2,3 und 4 hinzu:

- Beiträge zur Aufstellung und den Betrieb von RWE01 / RWE02 außerhalb des Kontrollbereichs, basierend auf den parallel laufenden Entwicklungen der Steuerung von RWE1.

#### AP6: Anlagenimplementierung

Nur in Bezug auf die Planung der späteren Implementierbarkeit von RWE02.

#### AP7: Evaluierung

Evaluierung der unter AP2, AP3, AP5 und AP6 vorgeschlagenen und bearbeiteten Konzepte im Hinblick auf die technische Umsetzungsfähigkeit (räumliche Anordnung, logistische Abläufe Arbeitssicherheitsaspekte, Verfahrenstechnik, Implementierbarkeit) wurde fortgeführt. Die Ergebnisse hieraus wurden soweit möglich wieder zurück zum Prototyp übertragen, um Designentscheidungen früh testen zu können.

#### AP8: Projektsteuerung/Administrative Projektarbeit

- Von RWE durchgeführt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Der nächste große Meilenstein ist der Abnahme-/Funktionstest der Rohform von RWE01 beim Auftragsfertiger. Die wichtigste notwendige Komponente für AP2 und AP3 ist hier die gemeinsame Schnittstelle für beide Prototypen, die sich gerade in den finalen Zügen der Entwicklung befindet. Neben einem Schnittstellentest, werden hier auch erste Rohscans durchgeführt, um den Gesamtprozess schon simulieren zu können, ohne diesen physikalisch ausführen zu müssen.

Des Weiteren werden weiterhin die im Demonstrator gewonnenen Erkenntnisse in AP2, AP3 und AP4 verarbeitet um den Scan, die Reinigung und den Simulationsprozess zu verfeinern.

Erkennung der Verspannung als Stör-Geometrien ist weiter ein großes Thema, da es unterschiedliche Spannvorrichtungen gibt, die verschiedener Erkennungsmethoden bedürfen. Ein vielversprechender Kandidat hierfür ist der Vergleich gegen bekannte Geometrie, da die Spanntechniken nicht beliebig platziert sein können.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine neuen gegenüber letztem Bericht.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Eine Veröffentlichung zur den Forschungsarbeiten im Projektkontext ist geplant und in Arbeit, zum aktuellen Zeitpunkt aber strategisch noch nicht sinnvoll.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9424
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover - Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> vom 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 490.926,41 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> denkena@ifw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit einer Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren, die eine deutliche Steigerung der Standzeit von Seilschleifprozessen von mindestens 50 % gegenüber konventionell ausgelegten Prozessen ermöglicht. Da bei der Bearbeitung von Metall kein Selbstschärfefekt der eingesetzten Schleifperlen auftritt, werden beim Seilschleifen dieser Werkstoffe derzeit ausschließlich einschichtig belegte Schleifperlen eingesetzt. Im Gegensatz zu den mehrschichtigen Schleifperlen liegt hier nur eine Lage Schleifkörner in der Bindung vor. Ist diese verschlissen, muss das komplette Seil ausgetauscht werden, sodass hohe Werkzeugkosten entstehen. In Kombination mit hohen thermischen Werkzeugbeanspruchungen ist die Standzeit der Diamantseilschleifwerkzeuge gering. Zudem kann bei vielen Rückbauanwendungen nicht mittels Wasser gekühlt werden, was zum Erreichen der thermischen Stabilitätsgrenze der Gummierung von etwa 100 °C führt. Aus diesen Gründen werden die temperaturrelevanten Systemgrößen Werkzeugspezifikation, Kühlung und freie Seillänge variiert und ihr Einfluss auf die Wärmebilanz bestimmt. Das entstandene empirische Modell verwendet die temperaturrelevanten Eingangsgrößen Kühlleistung, freie Werkzeuglänge und Werkzeugspezifikation und wird durch experimentelle Untersuchungen validiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1 Erweiterung des Versuchsstandes

Erweiterung des bestehenden Versuchsstandes zur Durchführung der geplanten Untersuchungen.

#### AP 1.2 Thermodynamische Betrachtung

Quantifizierung der im Seilschleifen relevanten Wärmeströme.

#### AP 2 Einfluss der Werkzeugspezifikation

Kenntnis des Einflusses der Werkzeugspezifikation auf die Wärmebilanz.

#### AP 3 Einsatzuntersuchungen und Verschleiß

Untersuchung des Verschleißverhaltens der Werkzeuge.

#### AP 4 Modellbildung

Modellbildung aus den gewonnenen Erkenntnissen der vorherigen APs.

#### AP 5 Validierung und Leistungsuntersuchung

Validierung des Modells und Einordnung des Prozesses in den Stand der Technik.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 1.1: Ziel des ersten Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Versuchsstands zur Durchführung der Laboruntersuchungen. Dafür wird neben der Erweiterung der am IFW vorhandenen, stationären Seilschleifmaschine auch ein bestehender Analogieprüfstand erweitert. Dieser wird auf einer konventionellen Flachsleifmaschine der Firma Geibel & Hotz montiert. Im aktuellen Berichtszeitraum wurde die bestehende stationäre Seilschleifmaschine erweitert. Diese besitzt eine Druckluftkühlungseinheit bestehend aus einem isolierten Durchlaufbereich des Seils und vier Vortex-Düse. Diese erzeugen aus Druckluft einen sehr kalten Luftstrom, der zur Kühlung des Seils eingesetzt wird. Bisher konnten lediglich alle vier Vortex-Düsen gleichzeitig geschaltet werden. Dadurch ist zwar eine effiziente Kühlung des Seils möglich. Allerdings fehlt dadurch die Möglichkeit, den Einfluss der eingebrachten Kühlleistung auf die Werkzeugtemperatur und auf den Schleifprozess systematisch zu quantifizieren. Deshalb wurde der Seilschleifprüfstand um eine schaltbare Kühleinheit erweitert, um die in das System eingebrachte Kühlleistung zu variieren und steht für die Versuche im folgenden Arbeitspaket zur Verfügung.

AP 1.2.: Parallel zur Fertigstellung des Versuchsstandes in Arbeitspaket 1.1 wurde die Bearbeitung des Arbeitspakets 1.2 fortgeführt. Ziel ist es hier, relevante Einflussfaktoren auf die Werkzeugtemperatur zu identifizieren. Dafür wurde zunächst die Leerlauftemperatur bestimmt. Diese wird durch die Umfangsgeschwindigkeit, die Vorspannkraft und die Reibung an den Umlenkrollen beeinflusst. Es wurde die Werkzeuglänge soweit es der Maschinenraum zulässt variiert. Die Seillänge wurde im Leerlauf in 5 Stufen variiert und die resultierende Werkzeugtemperatur bei unterschiedlichen Spanndrücken gemessen. Dabei zeigt sich, dass die Temperatur aufgrund der inneren Reibung durch Biegewechselbelastung und Reibung erhöht. In Korrelation mit dem Spanndruck konnte hierbei gezeigt werden, dass die Temperatur nicht linear zunimmt degressiv zunimmt. Ein ähnliches Verhalten ergibt die Korrelation mit der Werkzeuglänge. Das Verhalten konnte bei der Temperaturmessung beim Schleifen bestätigt werden. Dadurch lässt sich zeigen, dass eine Erhöhung der Werkzeuglänge zwar eine erhöhte Kühlung an der Luft bedingt, es aber einen optimalen Bereich gibt, in dem durch nur geringe Erhöhung der Werkzeuglänge eine signifikante Verringerung der Temperatur eintritt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Bestimmung der Wärmeaufteilungsfaktoren im System verwendet und bilden die Grundlage für das in AP 4 geplante Modell zum Einfluss der Umgebungsbedingungen und Prozessgrößen auf die Werkzeugtemperatur.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 1.2.: Die Analyse der Werkzeugtemperatur wird fortgeführt. Dazu werden die Untersuchungen mit im Eingriff befindlichen Seilen angeschlossen. Zudem wird der Einfluss des mikroskopischen Verschleißes auf das Einsatzverhalten untersucht, da dieser signifikant die Lebensdauer beeinflusst.

AP2: Im zweiten Arbeitspaket wird der Einfluss der Werkzeugspezifikation auf das Einsatzverhalten untersucht. Erste Ergebnisse haben bereits gezeigt, dass durch Anpassung der Segmentlänge die Einzelkornspannungsdicke vergrößert wird, wodurch ein effizienterer Schleifprozess entsteht. Dies verringert die Reibung im Prozess und die damit entstehende Wärme. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensdauer der Werkzeuge aus. Es ist deshalb in Absprache mit verschiedenen Herstellern der Seile geplant, die Segmentlänge im ersten Schritt in drei Stufen zu variieren.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)	
<b>Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: Parametervalidierung zum Tiefschnitt von hochbewehrtem Stahlbeton und Erprobung eines neuartigen Anbaugeräts zur Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 825.374,50 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Forschungseinrichtung mit den Industriepartnern Herrenknecht AG und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll komplett auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind.

Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 0:	Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
Arbeitspaket 1:	Analyse des Stands der Technik
Arbeitspaket 2:	Schnittprozessanalyse und -verbesserung
Arbeitspaket 3:	Absaugungskonzept für den Materialabtransport
Arbeitspaket 4:	Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 5:	Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
Arbeitspaket 6:	Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 7:	Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Rahmen des AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ wurden seit dem Frühjahr 2021 mit dem „DefAhS“-Demonstrator am KIT mittlerweile mehrere Versuchsreihen mit verschiedenen Werkzeugaufbauten getestet. Hier haben sich die bisher verwendeten Schräglamellen im Außenbereich der Frästrommel aufgrund des unzureichenden Abtrags im Innenbereich der Nut sowie der aufwändigen Teilebeschaffung nicht durchsetzen können. Es wurde hingegen vom Projektpartner Herrenknecht ein Konzept mit außenliegenden Trennscheiben entwickelt, welches bis jetzt einige Vorteile – wie eine reduzierte Anzahl an Spezialwerkzeugen, einen gleichmäßigeren Abtrag im Innenbereich, eine konstante Nutbreite sowie eine glatte Nutaußenkante – aufweist. Dieses wurde im Halbjahr II/2021 aufgebaut sowie bereits getestet. Hierzu waren Umbauten an der Frästrommel sowie die Neuanfertigung einiger Werkzeuge und Bauteile notwendig. Aufgrund der neuen Komponenten müssen außerdem bereits ermittelte Parameter neu überprüft werden. Die notwendigen Testreihen mit diesem Aufbau konnten aufgrund von Verzögerungen im Jahr 2021 nicht abgeschlossen werden.

Im Halbjahr II/2021 konnten außerdem neue Versuche an der Contec-Bodenfräse geplant werden, welche einen benachbarten, kleineren Versuchsstand darstellt. Hierbei sollen grundlegende Versuchsparameter als Grundlage für das Trennscheibenkonzept von DefAhS parallel untersucht werden.

Im Halbjahr II/2021 konnte im AP3 eine Konzeptplanung aufgestellt sowie der Bau eines Prototyps gestartet werden. Abgeschlossen werden konnte das AP3 im Jahr 2021 jedoch nicht wie geplant.

Des Weiteren wurde in enger und intensiver Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Beschaffung des Trägergeräts für das AP7 im Jahr 2023 geplant und getätigt.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Rahmen des AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ soll die neuartige Trennscheibenvariante weiter untersucht und optimiert werden, um eine breite Datengrundlage für die Auslegung der „MAARISS“-Komponenten zu schaffen. Hierbei ist insbesondere der zeitaufwändige Tiefenabtrag entscheidend, wobei erst nach dem Fräsen mehrerer Bewehrungslagen ein abschließendes Fazit zum Einsatz der Werkzeuge gezogen werden kann. Hier fließen auch die Erkenntnisse aus den Ergebnissen des Contec-Versuchsstands ein. Neben den Untersuchungen zum Trennscheibenkonzept im stabförmig-bewehrten Stahlbeton stehen für das Halbjahr I/2022 noch Versuche im Probekörper mit teils massiven Stahleinbauten an. Außerdem sollen alternative Wendescheidplatten getestet werden, welche in ihrer Geometrie widerstandsfähiger gegen den Kontakt mit Beton sind.

Die durchgeführten Versuche stellen außerdem die Arbeitsgrundlage für das anlaufende AP5 „Datenerfassung / Integration von Datenanalysen“ dar. In den Versuchen müssen die relevanten Größen mittels Sensoren ermittelt und anschließend ausgewertet werden. Die charakteristischen Werte sollen den Ausgangspunkt für die automatisierte Auswahl der Fräsbetriebszustände bilden. Im AP5 müssen somit weitere Sensoren integriert werden. Außerdem ist eine Anpassung der Steuerungssoftware zur Durchführung weiterer Versuche sowie zur Datenverarbeitung und Kopplung verschiedener Sensoren und Betriebsdaten des Versuchsstandes notwendig.

Im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ soll im kommenden Halbjahr der Prototyp fertig erstellt und im Rahmen der Fräsversuche getestet werden.

Vom 21.-22.6.2022 soll die Konferenz „Kerntechnik 2022“ in Leipzig stattfinden. Hierfür wurde das Projekt MAARISS für einen Vortrag ausgewählt. Hier wird im Voraus ein Fullpaper eingereicht.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAHS)

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Auf der „KONTEC 2021“, die dieses Jahr vom 25.08-27.08.2021 in Dresden stattgefunden hat, wurde ein Postervortrag zur Entwicklung des „Mobilen Anbaugeräts zur automatisierten Rissüberfräsung“ gehalten und ein dazugehöriges Paper veröffentlicht.

Vom 10. bis 12. November 2021 fand das Forschungssymposium „safeND“ vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) statt. In diesem Rahmen wurde das Projekt MAARISS in einer Vor-Ort-Präsentation mit dem Titel „Mobile Attachment for Automated Crack Milling“ vorgestellt sowie ein Abstract publiziert.

Das „Biennial Forum of the International Decommissioning Network“ der IAEA fand vom 13.-15.12.2021 in hybrider Form im Hauptsitz der IAEA in Wien und in digitaler Form statt. In der Session „Aktuelle technische Innovationen zur Unterstützung von Rückbauprojekten“ wurde das Projekt MAARISS mit dem Vortrag mit Titel „Development of a Tool for Crack Over Milling Highly Reinforced Concrete“ vorgestellt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Herrenknecht AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: Konzeptionierung eines hochflexiblen Anbaugerätes als Prüfstand zur experimentellen Untersuchung für die Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen sowie Neukonzeptionierung eines Absaugsystems für den Materialabtransport	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 433.937,82 € €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> wehrmeyer.gerhard@herrenknecht.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert die Herrenknecht AG mit den Projektpartnern Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind. Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 0:	Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
Arbeitspaket 1:	Analyse des Stands der Technik
Arbeitspaket 2:	Schnittprozessanalyse und -verbesserung
Arbeitspaket 3:	Absaugungskonzept für den Materialabtransport
Arbeitspaket 4:	Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 5:	Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
Arbeitspaket 6:	Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 7:	Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Rahmen des AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ wurden diverse Tests an beiden Versuchsständen am KIT durchgeführt. Dazu wurden unter anderem neue Abbauwerkzeuge vorbereitet und bereitgestellt. Außerdem wurden die zu untersuchenden Parameter für die jeweiligen Versuchsreihen vorab mit dem Projektpartner KIT gemeinsam abgestimmt. Aufgrund der positiven bzw. vielversprechenden Ergebnissen bei den Versuchen mit den weiterentwickelten Abbauwerkzeugen wird diese Art der Bestückung beibehalten.

Insbesondere der vereinfachte Aufbau der Werkzeugbestückung sowie die gleichmäßigere und voraussichtlich höhere Abtragsleistung sprechen eindeutig für die neu konfigurierte Werkzeugbestückung.

Die Herrenknecht AG unterstützte das KIT generell bei der Ausführung und Auswertung der eingeplanten und durchgeführten Versuchsreihen an beiden Versuchsständen.

Im Rahmen des AP4 „Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts“ wurde das zwischenzeitlich bestbewertete und somit favorisierte Konzept für den Fräsantrieb weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang wurde die grundlegende Machbarkeit anhand eines vorab konstruierten und angefertigten Testmodells praxisnah untersucht. Hierbei wurden einige wichtige bzw. entscheidende Erkenntnisse erzielt, welche bei der weiteren Detaillierung maßgeblichen Einfluss haben. Die Weiterentwicklung des Fräsantriebskonzeptes umfasste im wesentlichen folgende Aufgabenstellungen:

- Auslegung und Integration der hydraulischen Antriebsmotoren in der Fräswalze
- Konstruktive Ausarbeitung der Ölversorgung für die integrierten Hydraulikmotoren
- Anordnung und Dimensionierung der Lagerung für die Antriebskomponenten sowie Fräswalze
- Erstellung eines Schmierungskonzeptes für die unterschiedlichen Betriebspositionen
- Konstruktive Anbindung des Fräsantriebes an das Linearführungssystem

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Rahmen der weiteren Versuchsreihen im AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ am KIT werden die dazu erforderlichen und aktuell vielversprechenden neuartigen Werkzeugvarianten in Form von weiteren Trennscheibensegmenten und alternativen Wendeschneidplatten bereitgestellt. Die in diesem Zusammenhang zu untersuchenden und empirisch zu ermittelnden Werte dienen in erster Linie zur Definition der optimalen Schnittprozessparameter für den weiterentwickelten Abbauprozess. Zudem sind die modifizierte Werkzeugbestückung sowie die aus den Versuchsreihen resultierenden Betriebsdaten bei der finalen Bearbeitung des AP4 sowie in dem unmittelbar daran anschließenden AP6 zu berücksichtigen.

Das KIT wird von Seiten der Herrenknecht AG kontinuierlich bei der Versuchsplanung und Bewertung der Ergebnisse und Erkenntnisse sowie der Ableitung von den entsprechenden Maßnahmen weitreichend unterstützt.

Der im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ zwischenzeitlich durch das KIT vorliegende Konzeptentwurf soll bei der finalen Bearbeitung des AP4 noch berücksichtigt werden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den weiteren geplanten Fräsversuchen mit dem Prototypenaufbau sind in Form von Anpassungen und Optimierungen im Rahmen des parallel in Bearbeitung befindlichen AP6 umzusetzen.

Im Rahmen des AP4 „Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts“ werden die aktuell bereits existierenden Konzepte für den Fräsantrieb, die Linearführung sowie das Befestigungssystem weiter im Detail final ausgearbeitet und zu einem Gesamtkonzept kombiniert. Der Schwerpunkt liegt hierbei im Wesentlichen in der Konzeptionierung und Dimensionierung der einzelnen Systemkomponenten.

Gemäß der Projektplanung erfolgt auf Basis des in AP4 im Detail ausgearbeiteten Gesamtkonzeptes dann die anschließende im Rahmen von AP6 „Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts“ vorgesehene konstruktive Ausarbeitung der einzelnen Systemkomponenten inklusive der Erstellung von Fertigungszeichnungen.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAhS)

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Auf der „KONTEC 2021“, die dieses Jahr vom 25.08-27.08.2021 in Dresden stattgefunden hat, wurde ein Postervortrag zur Entwicklung des „Mobilen Anbaugeräts zur automatisierten Rissüberfräsung“ gehalten und ein dazugehöriges Paper veröffentlicht.

Vom 10. bis 12. November 2021 fand das Forschungssymposium „safeND“ vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) statt. In diesem Rahmen wurde das Projekt MAARISS in einer Vor-Ort-Präsentation mit dem Titel „Mobile Attachment for Automated Crack Milling“ vorgestellt sowie ein Abstract publiziert.

Das „Biennial Forum of the International Decommissioning Network“ der IAEA fand vom 13.-15.12.2021 in hybrider Form im Hauptsitz der IAEA in Wien und in digitaler Form statt. In der

Session „Aktuelle technische Innovationen zur Unterstützung von Rückbauprojekten“ wurde das Projekt MAARISS mit dem Vortrag mit Titel „Development of a Tool for Crack Over Milling Highly Reinforced Concrete“ vorgestellt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Kraftanlagen Heidelberg GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilprojekt: Fachkundige Planungs- und Projektberatung zu den Anforderungen an ein mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung und deren Umsetzung sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 70.869,12 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jonas Braun	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> jonas.braun@kraftanlagen.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Forschungseinrichtung mit den Industriepartnern Herrenknecht AG und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll komplett auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind.

Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 0:	Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
Arbeitspaket 1:	Analyse des Stands der Technik
Arbeitspaket 2:	Schnittprozessanalyse und -verbesserung
Arbeitspaket 3:	Absaugungskonzept für den Materialabtransport
Arbeitspaket 4:	Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 5:	Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
Arbeitspaket 6:	Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
Arbeitspaket 7:	Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Verbundprojekt MAARISS wurden, neben dem kontinuierlich bearbeiteten AP 0 „Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik“ im Berichtszeitraum das AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“, das AP 3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ sowie das AP 4 „Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)“ bearbeitet.

Kraftanlagen Heidelberg unterstützte hierbei, im Rahmen des AP 0, die Projektpartner in den jeweiligen Arbeitspaketen durch das Einbringen von Erfahrungen und spez. Knowhow, das im Rückbau von kerntechnischen Anlagen gesammelt werden konnte. So konnten u.a., in Abstimmung mit einem Energieversorgungsunternehmen (EVU), das kerntechnische Anlagen in Deutschland betreibt, spezielle gerätetechnische (Sicherheits-) Anforderung, verifiziert und festgelegt werden.

Weiter konnte Kraftanlagen Heidelberg die Projektpartner bei der Definition der Auswahlkriterien für die Festlegung eines Trägergeräts und den dafür notwendigen Adapter zur Aufnahme des Werkzeugs unterstützen. Daraus resultierend konnte die Beschaffung des Trägergeräts für das AP 7 durch das KIT getätigt werden.

## 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Rahmen des AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ soll die neuartige Trennscheibenvariante weiter untersucht und optimiert werden, um eine breite Datengrundlage für die Auslegung der MAARISS-Komponenten zu schaffen. Die durchgeführten Versuche stellen die Arbeitsgrundlage für das anlaufende AP 5 „Datenerfassung / Integration von Datenanalysen“ dar.

Im AP 3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ soll in Q1 & Q2'2022 der Prototyp fertig erstellt und im Rahmen der Fräsversuche getestet werden.

Im AP 4 „Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)“ konnten die Arbeiten weitestgehend abgeschlossen werden, sodass lediglich noch Rest- und Detailarbeiten notwendig sind. Diese bilden dann die Basis für das AP 6 „Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)“, das im Frühjahr startet.

Kraftanlagen Heidelberg wird dabei die Arbeiten der Projektpartner unterstützen und diese hinsichtlich der kerntechnischen Randbedingungen, Vorgaben etc. beraten.

Vom 21.-22.6.2022 soll die Konferenz „Kerntechnik 2022“ in Leipzig stattfinden. Hierfür wurde das Projekt MAARISS für einen Vortrag ausgewählt. Hier wird im Voraus ein Fullpaper eingereicht.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAhS)

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Auf der „KONTEC 2021“, die dieses Jahr vom 25.08-27.08.2021 in Dresden stattgefunden hat, wurde ein Postervortrag zur Entwicklung des „Mobilen Anbaugeräts zur automatisierten Rissüberfräsung“ gehalten und ein dazugehöriges Paper veröffentlicht.

Vom 10. bis 12. November 2021 fand das Forschungssymposium „safeND“ vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) statt. In diesem Rahmen wurde das Projekt MAARISS in einer Vor-Ort-Präsentation mit dem Titel „Mobile Attachment for Automated Crack Milling“ vorgestellt sowie ein Abstract publiziert.

Das „Biennial Forum of the International Decommissioning Network“ der IAEA fand vom 13.-15.12.2021 in hybrider Form im Hauptsitz der IAEA in Wien und in digitaler Form statt. In der Session „Aktuelle technische Innovationen zur Unterstützung von Rückbauprojekten“ wurde das Projekt MAARISS mit einem Vortrag mit dem Titel „Development of a Tool for Crack Over Milling Highly Reinforced Concrete“ vorgestellt

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (Sieb-Seil) – Teilprojekt: Simulationsbasierte Werkzeugauslegung und Untersuchung des Einsatzverhaltens	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 461.508,47 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> denkena@ifw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

### AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

**AP 1.1:** Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung.

Um die Nutzbarkeit des Simulationsmodells für die industriellen Partner sicherzustellen und deren Erfahrungen für den Aufbau des Simulationsmodells zu nutzen, wurden in Gesprächen mit den Projektpartnern DIABÜ und Cedima Anforderungen an die Simulation festgelegt. Zusätzlich zu den Setzmustern der Schleifsegmente sollen die Geometrie des Werkstücks (z. B. Block, Rohr), das Werkstückmaterial (Stahl, Beton) und die Prozessstellgrößen einstellbar sein. Relevante Ausgangsgrößen sind die Kräfte am einzelnen Korn und die Gesamtprozesskraft, die resultierende Maschinenleistung, die erreichbare Schnittfläche bzw. der Verschleiß der Schleifsegmente.

Das Simulationsmodell wurde um ein Kraftmodell erweitert. Damit ist die kraftgesteuerte Zustellung der Schleifsegmente möglich. Die Seilkraft wird dabei durch die Vorspannung des Seils und dessen Auslenkung bestimmt. Dementgegen wirkt die Normalkraft, welche durch das Eindringen der Schleifkörner in das Werkstück entsteht. Für diese wurde zunächst das Modell des Kontaktes einer starren Kugel (Schleifkorn) mit einem elastischen Körper (Werkstück) gewählt. Bild 1 zeigt auf der linken Seite ein Bild der Simulation mit einem beispielhaften Schleifsegment, dem Werkstück und dem simulierten Werkstoffabtrag.

**AP 1.2:** Es wurden verschiedene Simulationen auf der Basis eines zentral zusammengesetzten Versuchsplanes durchgeführt. Dabei wurden die Korngröße, das Setzmuster und die Prozessstellgrößen systematisch variiert. Anhand der dabei generierten Daten wurde ein lineares Regressionsmodell erstellt, welches den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (Korngröße, Setzmuster und Prozessstellgrößen) und der mittleren Spannungsdicke je Korn beschreibt. Auf der rechten Seite von Bild 1 ist beispielhaft der Einfluss des tangentialen Kornabstandes auf den Median der Spannungsdicke dargestellt. Hier zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kornabstand und der mittleren Eindringtiefe des einzelnen Kornes. Die Spannungsdicke wird außerdem signifikant durch den axialen Kornabstand und den Versatz der Schleifkörner beeinflusst. Mit einem solchen Regressionsmodell ist es möglich, eine Optimierung des Setzmusters anhand verschiedener Zielgrößen vorzunehmen. In einem ersten Schritt wurde dafür eine Optimierungsfunktion verwendet, welche die mittlere Spannungsdicke maximiert und die Streuung der Spannungsdicke minimiert.

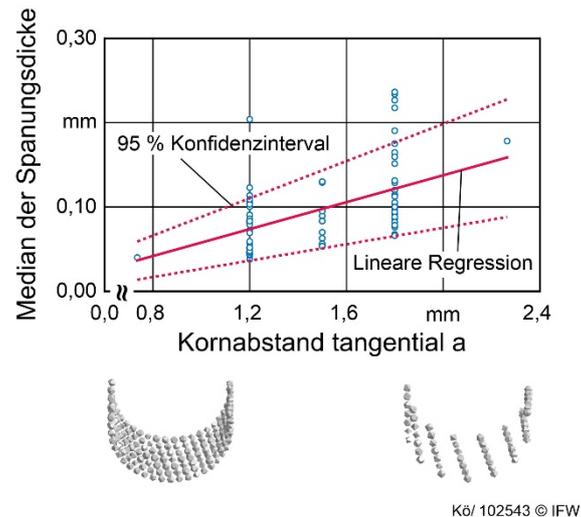
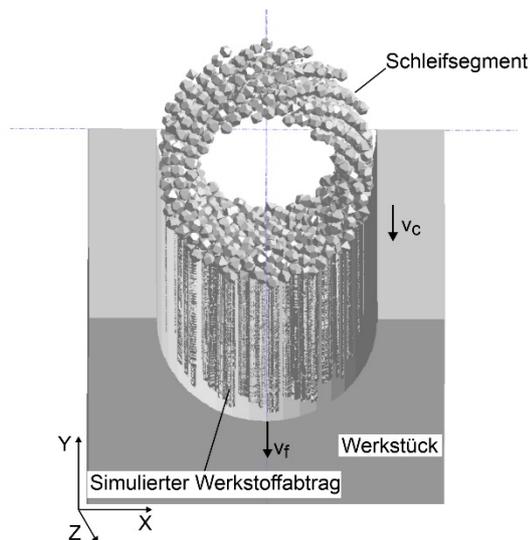


Bild 1: Links: Beispielhaftes Bild einer Schleifperle mit simuliertem Materialabtrag. Rechts: Zusammenhang zwischen dem tangentialen Kornabstand und dem Median der Spannungsdicke basierend auf den Daten aus dem zentral zusammengesetzten Versuchsplan.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

**AP 1.1:** Das Simulationsmodell wird stetig erweitert und angepasst, wie beispielsweise die Berücksichtigung von verschiedenen Grundformen der Schleifsegmente. Neben der standardmäßigen Zylinderform wird auf Wunsch der Partner aus der Industrie zusätzlich eine konische und eine kugelförmige Form der Schleifsegmente in das Simulationsmodell integriert, da sich diese Formen in der Praxis als vorteilhaft erwiesen haben.

**AP 1.2:** Es werden weitere Simulationen mit der neuen, kraftgeregelten Zustellung durchgeführt. Darauf aufbauend werden optimale Setzmuster für verschiedene Zielgrößen, wie beispielsweise ein maximales Abtragsvolumen, entwickelt.

**AP 3:** Nach Fertigstellung der ersten Schleifsegmente mit deterministischem Setzmuster werden Einsatzversuche an einem Analogieversuchstand durchgeführt, um die Simulationen zu validieren und gegebenenfalls anzupassen.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) – Institutsteil Dresden		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) – Teilprojekt: Bindungs- und fertigungsspezifische Seilschleifwerkzeugentwicklung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 464.794,30 €	
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Thomas Weißgärber	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> thomas.weißgärber@ifam-dd.fraunhofer.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom Fraunhofer IFAM Dresden und der DIABÜ GmbH entwickelten Variante eines Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### **AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe**

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### **AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen**

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### **AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung**

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### **AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung**

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

**AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

**AP 1.3:** In dem Arbeitspaket steht vor allem die Recherche und Evaluierung von geeigneten Pulverwerkstoffen für die Bindung von CBN Schneidpartikeln und die CBN Partikel an sich im Fokus der arbeiten. Hieraus ergaben sich verschiedene und bereits zum Teil auch schon etablierte Kategorien für die Werkstoffbasis: (1) Eisenbasislegierungen; (2) Legierungen auf Basis von Kupfer- / Bronze; (3) Nickelbasislegierungen. Als vielversprechend werden auch Matrix-Systeme aus den vorgenannten Basislegierungen mit Verstärkungsphasen aus Hartmetall und/oder Keramik angesehen. Etablierte metallische Bindungen mit Cobalt in der Matrix dürfen hierbei nicht unerwähnt bleiben.

Bei den CBN Schleifkornmaterialien wurde in diesem Arbeitspunkt auf bestehende Erfahrungen der beteiligten Industriepartner zurückgegriffen und um Themen wie optimierte Partikelanbindung durch Schneidpartikelbeschichtungen erweitert. Weiterhin wurden am Markt verfügbare CBN Partikelgrößen und CBN Qualitäten recherchiert. Die Angebotspalette bezüglich verfügbarer Qualitäten ist in den groben Kornfraktionen größer 250 µm (60 Mesh) eher eingeschränkt. Die beziehbaren Qualitäten reichen über alle CBN-Partikelgrößen von Scharfkantig mit geringer Festigkeit bis blockig mit sehr hoher Festigkeit. Weiterhin sind bereits angesprochene Beschichtungen zur optimierten Anbindung an die Bindematrix verfügbar, welche meist aus Nickel oder Titan im Abscheideverfahren ausgeführt sind.

**AP2.1:** Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Untersuchung und Bewertung der Anwendung der gewählten Werkstoffe in dem avisierten additiven Fertigungsverfahren. Als zentrale Randbedingungen für die Pulverwerkstoffe der Bindematrix sind hierbei neben der Partikelform vor allem die Partikelgrößen aufzuführen, da die Pulver später durch die entsprechenden Druckwerkzeuge reproduzierbar durchgeführt werden müssen. Selbes gilt für die CBN-Schleifpartikel, welche mit den Größenordnungen der Positionswerkzeuge abgestimmt werden müssen. Bei den Analysen wurde ermittelt, dass die geordneten Siebfraktionsklassen im mittleren Partikeldurchmesser (mean feret) nur zu etwa 5 % mit den avisierten Partikelgrößen übereinstimmen. Dies muss bei der Auslegung von Positionierungs-Druckwerkzeugen beachtet werden.

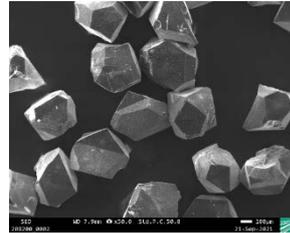
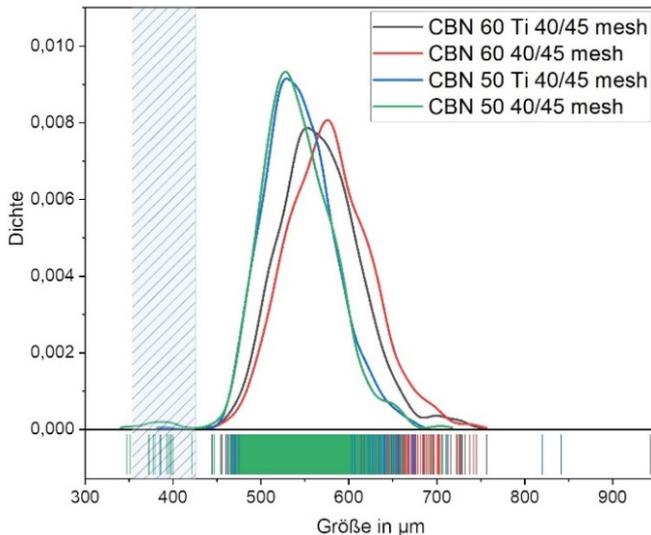


Abbildung 1: CBN Partikel - Größenabweichung Siebfraktion 40/45 mesh (schraffiertes Feld) vs. analysierter mittlerer Feret-Durchmesser. ©Fraunhofer IFAM

**AP2.2:** Auf Basis von bereits evaluierten Verfahrensparametern wurden vom Fraunhofer IFAM zwei zentrale Setzmusteranordnungen ausgelegt und in die benötigte CAD Basis für die Druckwerkzeugherstellung überführt. Gegen Ende des Berichtszeitraumes wurde die Erstellung der Druckwerkzeuge bei externen Werkzeugdienstleistern beauftragt.

Parallel wurden die ersten Positionsmuster der ausgelegten Anordnungen dem AP 1.1 und AP 1.2 zur Einbindung in laufende Simulationen bereitgestellt.

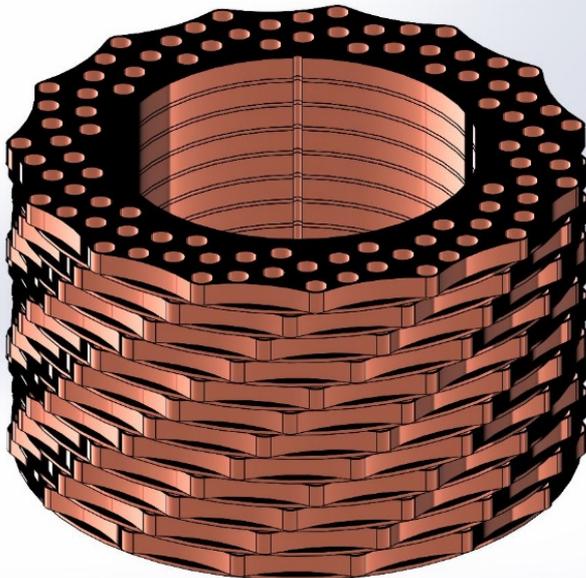


Abbildung 2: 3D-Model einer Schneidperle mit CBN-Partikelmuster. ©Fraunhofer IFAM

#### 4. Geplante Weiterarbeit

**AP 1.3:** Auf Basis der bisherigen Daten werden die verschiedenen Werkstoffe und erstellten Matrixmischungen weiter untersucht und bewertet. Hierbei wird vor allem der Fokus auf die Wärmebehandlung von binderbasierten 3D Druck Probekörper liegen.

**AP2.1:** Die erstellten Druckwerkzeuge für AP2.2 werden in der ersten Iteration parallel auch für die Werkstoffbewertung mit heran gezogen, um die finale Anwendbarkeit der Werkstoffe und CBN-Partikel im Druckprozess zu bewerten. Neben den Werkstoffuntersuchungen wird hierbei vor allem die Untersuchung und Entwicklung geeigneter Pasten Formulierungen eine zentrale

Rolle einnehmen. Eine stabile Druckpaste ist hierbei die Basis für optimale und reproduzierbare Parameter im Druckprozess.

**AP2.2:** Mit Jahresanfang 2022 liegen die Druckwerkzeuge für die geplanten Drucktests vor, womit parallel zu den Versuchen zur Bewertung der Werkstoffe und zur Entwicklung der Druckpasten auch mit den ersten 3D Druck von Testkörpern und von Seilschleifperlen für die Analogietest gestartet werden kann.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CEDIMA Diamantwerkzeug und Maschinenbaugesellschaft mbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (Sieb-Seil) Teilprojekt: Einfluss der Verwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung auf die im industriellen Rückbau verwendete Maschinentechologie	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 56.618,71 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Mirko Kniese	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> mirko.kniese@cedima.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

**AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

**AP 1.1:** Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung.

Um die Nutzbarkeit des Simulationsmodells für die industriellen Praxis sicherzustellen und Erfahrungen aus der Industrie für den Aufbau des Simulationsmodells zu nutzen, wurden in Gesprächen mit den Projektpartnern Anforderungen an die Simulation festgelegt. Zusätzlich zu den Setzmustern der Schleifsegmente sollen die Geometrie des Werkstücks (z. B. Block, Rohr), das Werkstückmaterial (Stahl, Beton) und die Prozessstellgrößen einstellbar sein. Relevante Ausgangsgrößen sind die Kräfte am einzelnen Korn und die Gesamtprozesskraft, die resultierende Maschinenleistung, die erreichbare Schnittfläche bzw. der Verschleiß der Schleifsegmente.

Das Simulationsmodell wurde um ein Kraftmodell erweitert. Damit ist die kraftgesteuerte Zustellung der Schleifsegmente möglich. Die Seilkraft wird dabei durch die Vorspannung des Seils und dessen Auslenkung bestimmt. Dementgegen wirkt die Normalkraft, welche durch das Eindringen der Schleifkörner in das Werkstück entsteht. Diese zusätzlichen Parameter ermöglichen eine weitaus differenzierte Simulation des Schleifprozesses.

In der Untersuchung der Bindungswerkstoffe und Schneidstoffe ergab sich eine neue Betrachtung des derzeit bevorzugten CBN Materials, ein Vergleich verschiedener Hersteller zur Korngröße und Qualität wurde durchgeführt.

**AP 1.2:** Es wurden verschiedene Simulationen auf der Basis eines zentral zusammengesetzten Versuchsplanes durchgeführt. Dabei wurden die Korngröße, das Setzmuster und die Prozessstellgrößen systematisch variiert. Anhand der dabei generierten Daten wurde ein lineares Regressionsmodell erstellt, welches den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (Korngröße, Setzmuster und Prozessstellgrößen) und der mittleren Spannungsdicke je Korn beschreibt. Hier zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kornabstand und der mittleren Eindringtiefe des einzelnen Kornes. Die Spannungsdicke wird außerdem signifikant durch den axialen Kornabstand und den Versatz der Schleifkörner beeinflusst. Mit einem solchen Regressionsmodell ist es möglich, eine Optimierung des Setzmusters anhand verschiedener Zielgrößen vorzunehmen

Zusätzlich wurden Testaufbauten in unserem Technikum zum effektiven Einsatz der Werkzeuge durchgeführt. Die dabei aufgetretenen anfänglichen Schwierigkeiten konnten behoben werden.

**4. Geplante Weiterarbeit**

**AP 1.1:** Das Simulationsmodell wird stetig erweitert und angepasst, wie beispielsweise die Berücksichtigung von verschiedenen Grundformen der Schleifsegmente. Nach Rücksprache mit den anderen Projektpartnern ist es sinnvoll auch weitere Geometrien zu ergänzen. Neben der Zylinderform eine konische und eine kugelförmige Form.

Die Zusammensetzung und Auswahl der Bindungsmaterialien und Schneidstoffe wird weiterbearbeitet und anhand der erzielten Erkenntnisse aus der Simulation und den Praxisversuchen optimiert.

**AP 1.2:** Es werden weitere Simulationen mit der neuen, kraftgeregelten Zustellung durchgeführt. Darauf aufbauend werden optimale Setzmuster für verschiedene Zielgrößen, wie beispielsweise ein maximales Abtragsvolumen, entwickelt.

Es sind Optimierungen der Testabläufe und -aufbauten im Technikum vorgesehen.

**AP 3:** Nach Fertigstellung der ersten Schleifsegmente mit deterministischem Setzmuster werden Einsatzversuche an einem Analogieversuchstand durchgeführt, um die Simulationen zu validieren und gegebenenfalls anzupassen.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CCD Diamanttechnik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifwerkzeuge mittels additiver Siebdrucktechnologie Teilvorhaben: Anwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung im industriellen Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 51.151,28 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Uwe Gerecke	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> ug@ccd-diamanttechnik.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

### **AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP1: Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung sowie die Identifikation geeigneter Bindungswerkstoffe, welche im Siebdruckverfahren nutzbar sind und die Leistungsfähigkeit der Schleifsegmente, durch z. B. eine Selbstschärfung, erhöhen. Der Zuwendungsempfänger hat keine Anteile am ersten Arbeitspaket.

Im zweiten Halbjahr 2021 hat CCD Diamanttechnik die für die Durchführung großformatiger Seilschleifarbeiten unter realen Einsatzbedingungen erforderliche Sägemaschine in Form von transportablen Modulen weiterentwickelt, gebaut und die für ersten Probeschnitte vorbereitet. Bearbeitbar sind Werkstücke mit einem Durchmesser von maximal 4.300mm Erste Schnitte mit handelsüblichen Seilen wurden durchgeführt und Prozessdaten für Referenzzwecke gesammelt.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP5: Es werden fortlaufend potentielle Probekörper und Rückbauprojekte für die Einsatzuntersuchungen im letzten Arbeitspaket gesichtet und gesammelt.

Die weitgehend fertig gestellte Portalsäge wird untersucht, ob die Antriebsleistung von zurzeit 15kW auf bis zu 45kW erhöht werden kann und wenn möglich soll diese Erhöhung der Antriebsleistung realisiert werden. In einem Walzwerk sollen dann damit Walzen aus Stahlguss mit ca. 15,6%Cr und 750mm Durchmesser getrennt werden. Für dabei anfallende Probekörper werden geeignete Transport- und Lagerbarillen gefertigt. (Einzelgewicht bis zu 16t)

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Diverse Anwendungen der Seilschleiftechnik im industriellen Bereich

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429E
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> DIABÜ-Diamantwerkzeuge Heinz Büttner GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (Sieb-Seil). Teilprojekt: Auslegung und Herstellung neuartiger Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schneidstoffanordnung.	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 77.060,70 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dirk Büttner	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> buettner@diabue.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

### AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP1: Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung sowie die Identifikation geeigneter Bindungswerkstoffe, welche im Siebdruckverfahren nutzbar sind und die Leistungsfähigkeit der Schleifsegmente, durch z. B. eine Selbstschärfung, erhöhen. Es wurden Anforderungen an das Simulationsmodell zum Seilschleifen mit deterministischen Kornanordnungen aus Sicht eines Werkzeugherstellers zusammengetragen.

Die deterministischen Kornanordnungen wurden in einem ersten Simulationslauf hin untersucht und mit Erfahrungen aus der Sägepraxis verglichen. Anhand der Simulation der Kornanordnung im Werkzeug konnten aus den vielen Einflussparametern die wichtigsten Stellgrößen ermittelt werden. Diese theoretisch ermittelten Hauptparameter scheinen sich mit der Praxis zu decken und sollen in die weitere Werkzeugauslegung einfließen. Dabei wurden in Gesprächen mit den Projektpartnern weitere Prozessstellgrößen ermittelt, wie die Schnittkräfte am Korn, die Korngröße und deren Abstand im Werkzeug, das zu zerspanende Material, der Verschleiß und die Zerspanungsleistung. Zusätzlich wurde mit der Recherche zu geeigneten Bindungswerkstoffen für das geplante Vorhaben begonnen und weitere Pulver und Lieferanten gefunden.

Für die Druck- und Pastenentwicklung wurden erste Metallpulver ausgesucht und zeitnah bestellt und an das IFAM geliefert. Parallel wurden extern Pasten- und Druckversuche initiiert. Die extern beauftragten Werkzeuge wurden direkt bei einem Kunden im Produktionsprozess getestet.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP1: Nachdem im ersten Schritt die Simulationsmodelle mit den Projektpartnern diskutiert wurden, wurde das Lastenheft und das Modell erweitert. Basierend auf der ersten Recherche zu geeigneten Bindungswerkstoffen erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner IFAM die Beschaffung und Analyse zusätzlicher Bindungswerkstoffe und Schneidpartikel.

AP2: Sobald die weiteren Simulationen mit den kraftgeregelten Zustellungen Ergebnisse liefern, wird das optimale Setzmuster zusammen mit den Projektpartnern weiterentwickelt, um erste Prototypen mit den ausgewählten Setzmustern herzustellen.

AP3: Parallel hat DIABÜ erste Prototypen mit einem bei DIABÜ neu entwickelten Setzmuster extern herstellen lassen, das auf einem Prüfstand vom IFW und gleichzeitig in der Sägepraxis getestet werden soll. Die Simulation dieses Setzmusters sah ebenfalls vielversprechend aus.

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9430A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Werkstoffkunde	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogentrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilvorhaben: CAMG-Prozess	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.400.000 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Thomas Hassel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hassel@iw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie ergeben sich in Deutschland neue Herausforderungen bei der technischen Realisierung von Stilllegungs- und Rückbauprojekten. Hierzu sind robuste und sicher durchführbare Technologien erforderlich, die fernhantiert und unter einer Wasserabdeckung zum Einsatz kommen können. Durch die Klassifizierung möglicher Trennverfahren für metallische Werkstoffe in TRL (Technology Readiness Level) von 1-9 kann eine qualifizierte, situationsbedingte Auswahl der Verfahren getroffen werden, wodurch die Sicherheit des Rückbauprozesses erhöht wird. Einen besonderen Vorteil stellen dabei die thermischen Trennverfahren, auf Grund des vereinfachten Manipulationsaufwandes durch das rückstellkraftfreie Arbeiten, dar.

In diesem Forschungsvorhaben soll die Entwicklung des automatisierten CAMG-Schneidverfahrens, welches aktuell bei einem TRL von 4-7 einzuordnen ist, vorangetrieben werden. Durch die Aufbringung von verschleißfesten Schneidwerkstoffen mittels additiver Fertigung soll eine deutliche Verringerung des Scheibenverschleißes ermöglicht werden.

Einen weiteren Punkt in dem das Verfahren optimiert werden muss stellt die Stromübertragung auf die rotierende Elektrode dar. Derzeit ist die Übertragung von Arbeitsströmen zwischen 850-3000 A nur durch große taktile Stromübertrager oder durch eine Stromübertragung mittels flüssigem Quecksilber möglich.

Zielsetzung des Projektes ist sowohl das Verfahren als auch die Schneidwerkstoffe weiter zu entwickeln und im Portfolio der thermischen Schneidverfahren für den kerntechnischen Rückbau zu etablieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt der Bau einer sowohl leistungs- sowie anwendungsfähigen Demonstratoranlage mittels welcher diese Technik (CAMG-Verfahren) auf TRL > 8 angehoben werden soll.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Durchführung des Projektes gliedert sich in drei Komplexe. Im Komplex A wird der Scheibenelektrodenverschleiß bewertet indem zunächst gut verfügbare und günstige Werkstoffe für den Prozess als Elektrode genutzt werden. Für die unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffe werden die Schneidaten durch mechanisierte Schneidversuche ermittelt. Die Verschleißergebnisse werden in Bezug zu der Schneidleistung diskutiert und hinsichtlich der

Gesamtprozessleistung interpretiert. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen werden Elektroden additiv gefertigt. Mittels eines Draht-/Pulverbasierten coaxialen Laserschweißprozesses werden Hartauftragungen in Umfangsrichtung auf einen Grundkörper aufgeschweißt. Durchgeführt wird dieser Fertigungsprozess an einem Roboterschweißplatz, wozu im Rahmen des Projektes eine Anlage installiert wird. Somit ist ein Werkstoffscreening hinsichtlich der Schneidwerkstoffe sowie ein quantitativer Überblick über das Potential der verfügbaren Schneidwerkstoffe möglich.

Damit zukünftig sichergestellt werden kann, dass die Planung der thermischen Zerlegung mit höchstmöglicher Sicherheit erfolgt, soll in Komplex B nach neuesten Erkenntnissen ein Prototyp eines Schneidgerätes entwickelt werden. Das Stromübertragungsmodul muss hierbei in Zusammenarbeit mit dem Partner EWN neu ausgelegt werden, um einen entsprechend hohen Leistungsbereich abdecken zu können. Bisherige Erfolge der Flüssigmetallstromübertragung werden genutzt und Gallium als nicht gefährdende Variante für den Flüssigkeitsstromübertrager gewählt. Wesentliche Schwerpunkte im Entwicklungsprozess sind die elektrische Auslegung und die Kapselung des Moduls.

Während der Projektlaufzeit und abschließend am Projektende werden in Komplex C die Entwicklungen zur Schneidelektrode aus Komplex A und dem Aufbau der Anlage im Komplex B zusammengeführt. Somit kann die Funktionsfähigkeit der Anlage sicher abgebildet werden und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Gesamtvorhaben durchgeführt werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

- Die Lieferung der robotergeführten Laserstrahlschweißanlage, die im Arbeitspakete A/1 installiert und in Betrieb genommen werden soll, verzögerte sich bedingt durch die Covid-19-Pandemie und erfolgte erst im Dezember 2021. Der bestellte Roboter konnte bereits im Fundament der Halle befestigt werden. Weitere Bestandteile der Anlage wurden für den Einbau vormontiert und die Stromversorgung vorbereitet.
- Die wissenschaftliche Recherche zu den Werkstoffsystemen wurde im Arbeitspaket A/2 weitergeführt. Eisen bildet auf Grund der guten Verfügbarkeit sowie der Leitfähigkeit und des guten Aufschmelzverhaltens eine sichere Basis zur Herstellung von Drähten und Pulvern für den Laserstrahlprozess. Desweiteren sollen für die Herstellung der Elektroden Werkstoffe wie Kupfer auf Grund der sehr guten elektrischen Leitfähigkeit, sowie Kohlenstoff zur Steigerung der Härte verwendet werden. Durch die Beimischung von Kobalt kann die Warmfestigkeit des Werkstoffes gesteigert werden, um so einen hochbelastbaren Werkstoff zu erhalten. Um den Schmelzpunkt des Werkstoffes zu erhöhen soll Wolfram verwendet werden, welches sich durch einen Schmelzpunkt von über 3000°C stark von anderen Bestandteilen abhebt. Einen weiteren Ansatz für Untersuchungen bietet ein Nickelbasiswerkstoff mit dem ein Elektrodenwerkstoff mit hohen Härtewerten sowie einer hohen Zähigkeit und Duktilität hergestellt werden kann.
- Basierend auf Informationen und Randbedingungen aus realen Anwendungsfällen wurde im Arbeitspaket B/1 der Entwurf eines Lastenheftes in Zusammenarbeit mit EWN erstellt. Das Lastenheft teilt sich dabei grob in zwei Bereiche. Zum einen wurden aus den Erfahrungen aus der Praxis die Zielgrößen für den Prozess wie Materialdicke, Bauteilgeometrien und Manipulationsraum konkretisiert. Neben den Prozessanforderungen wurden die Geräteanforderungen mit Unterkapiteln definiert. So konnten die Anforderungen an die Stromübertragung, die Kraftübertragung und die Abdichtung der Anlage einzeln spezifiziert werden.
- Zur Auslegung und Konstruktion des Kraftübertragungsstranges wurden im Arbeitspaket B/2 Recherchen, über die auf dem Markt verfügbaren Komponenten, durchgeführt. Durch die

vorrangige Verwendung von Zukaufteilen können zum einen die Herstellungskosten reduziert und im Fall eines Schadens ein schneller Austausch gewährleistet werden. Der Antrieb, die Kupplung, das Getriebe und die Abtriebswelle bilden die Hauptkomponenten die aufeinander abgestimmt werden und zudem einen möglichst kleinen Bauraum einnehmen sollen.

- Parallel zur Recherche und Auslegung des Kraftübertragungsstranges aus Arbeitspaket B/2 wurde im Arbeitspaket B/3 damit begonnen ein auf die benötigten Komponenten abgestimmtes Stromübertragungsmodul zu entwerfen.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

- Im ersten Schritt werden in Arbeitspaket A/1 alle Komponenten der Anlage aufgebaut. Die Arbeiten und die im Folgenden geplante Inbetriebnahme finden in Kooperation mit den beteiligten Lieferanten statt. Dabei werden neben einer anwendungsorientierten Herangehensweise ebenfalls Aspekte der Arbeits- und Lasersicherheit beachtet. Im Folgenden steht das Erlernen der praktischen Umsetzung und der Beherrschung des Systems sowie die Entwicklung geeigneter Aufspannvorrichtungen im Fokus. Darüber hinaus werden mittels Schulung vertiefte Kenntnisse der Roboterprogrammierung erlangt. Diese können anschließend für die ersten Proben aus den in A/2 ausgewählten Werkstoffsystemen eingesetzt werden. Dabei sollen erste Untersuchungen in Bezug auf die Grundlagen additiv gefertigter Strukturen durchgeführt werden. Dazu gehören Aspekte wie Risse, Porosität und Schweißnahtgeometrie.
- Die Recherche im Arbeitspaket A/2 wird beendet. Die ausgewählten Werkstoffe werden nun in Bezug auf die benötigten charakteristischen Eigenschaften wie die Härte und die elektrische Leitfähigkeit untersucht. Dabei erlaubt die DSC Methodik (differential scanning calorimetry) eine Bestimmung von Umwandlungspunkten und Schmelztemperaturen.
- Nach erfolgter Inbetriebnahme der Anlage können erste Versuche im Arbeitspaket A/3 durchgeführt werden. Einfache planare Strukturen bilden die Grundlage, um aufbauend auf den Arbeitspaketen A/1 und A/2 erste Aussagen zu den Schweißparametern oder den Bauteilcharakteristika treffen zu können.
- Für das Arbeitspaket B/1 ist die Fertigstellung des Lastenheftes nach der Durchsicht der beiden Projektpartner geplant. Basierend auf dem Lastenheft soll im nächsten Schritt ein Pflichtenheft formuliert werden. In diesem Arbeitsschritt wird ebenfalls in enger Zusammenarbeit ein gemeinsames Dokument erstellt.
- Im Arbeitspaket B/2 erfolgt nach abschließender Recherche und Berechnung der einzelnen Komponenten zur Auslegung des Kraftübertragungsstranges die Konstruktion der Bauteile. Erstellt werden diese mit der Software SolidWorks in der sowohl eine Baugruppe mit den Zukaufteilen als auch einzelne Fertigungszeichnungen erstellt werden. Die ausgewählten Bauteile sollen beschafft oder am Institut für Werkstoffkunde gefertigt werden. Der für die Rotation geplante wasserhydraulische Antrieb wird ebenfalls nach der Auslegung beschafft.
- Das Stromübertragungsmodul, welches im ersten Entwurf vorliegt soll in Arbeitspakete B/3 detailliert ausgelegt und berechnet werden, um als 3D-Modell zur Ableitung der Fertigungszeichnungen erstellt werden zu können.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es kann zurzeit kein Bezug zu anderen Vorhaben hergestellt werden.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9430B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogentrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilvorhaben: CAMG-Anwendung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 147.772,23 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. Torsten Wollermann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> torsten.wollermann@ewn-gmbh.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Für den Rückbau kontaminierter und aktivierter Metallstrukturen (z. B. Reaktorbauteile) stellt das fernhantierte Arbeiten unter einer Wasserabdeckung eine wichtige technologische Säule dar. Hierzu sind robuste und sichere Technologien erforderlich, welche als Alternativverfahren nebeneinander in einer Art Werkzeugkasten der Rückbautechnologien angeordnet sind. Dies ermöglicht die Realisierung technologischer Alternativen zur sicheren Erfüllung der Aufgabe. Schon in der Angebotsplanung sind Unternehmen gefordert Rückbauaufgaben sehr konkret und umfassend zu planen und die Trenntechniken festzulegen, welche nach dem Stand der Technik geprüft werden müssen. Im Forschungsprojekt wird das CAMG-Schneiden thematisiert, um es für den praktischen Einsatz vorzubereiten. Zielsetzung des Projektes ist es, sowohl das Verfahren als auch die Schneidwerkstoffe einsatzbereit zu entwickeln und in das Portfolio der thermischen Schneidverfahren für den Rückbau kerntechnischer Anlagen einzureihen. Das Gesamtziel des Projektes lässt sich durch zwei wesentliche Teilziele erreichen. Zum einen ist die Maschinenteknologie zum CAMG Schneiden aus dem labortechnischen Bereich in den anwendungstechnischen Bereich zu übertragen. Dies erfolgt im Wesentlichen durch die Entwicklung eines auf Gallium basierenden Hochstrom-Übertragers, durch welchen große Ströme auf die rotierende Scheibe übertragen werden können. Dazu wird ein modernes Gesamtkonzept zum Aufbau einer CAMG Maschine erarbeitet und umgesetzt, sodass der Einsatz unter praxisgleichen Bedingungen nachgewiesen werden kann. Zum anderen wird mittels neuer Fertigungsverfahren die Frage der Beständigkeit der Schneidscheiben erforscht indem belastbare und anwendungstaugliche Schneidstoffe entwickelt werden. Durch die Nutzung der additiven Fertigung besteht hier ein sehr großes Potential, erhebliche Fortschritte zu erzielen da die Schneidstoffe in großer Variabilität und Anzahl verfügbar sind und in kurzer Zeit hergestellt werden können.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

In Zusammenarbeit mit der Gottfried-Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde erfolgt sowohl der Aufbau einer leistungsfähigen und anwendungsfähigen Demonstratoranlage, um die Technik auf einen TRL>8 zu heben. Parallel dazu wird die Scheibenelektrode als zentraler Punkt der Forschung fokussiert, da die Kenntnisse zur

Beständigkeit und zum Verschleißverhalten als noch nicht ausreichend für die Anwendung erkannt sind.

Der Arbeitsplan ist dabei in die Komplexe A - Scheibenelektrodenverschleiß und B - CAMG – Schneidgerät und C – Zusammenführung der Entwicklungen untergliedert.

Bereich A:

- A/1 Roboterbasierte Laserschweißeinrichtung
- A/2 Verschleißschutzsysteme für die Scheibenwerkstoffe auf Draht- und Pulverbasis
- A/3 Schweißen von 3d Strukturen
- A/4 Untersuchung der Werkstoffeigenschaften der additiv gefertigten Materialien
- A/5 Herstellung von Schneidscheiben zur Anwendung
- A/6 Untersuchung des Werkzeugverschleißes
- A/7 Erarbeitung eines Werkstoffrankings
- A/8 Wirtschaftliche Betrachtung zur Kostenentwicklung des Scheibensystems

Bereich B:

- B/1 Erstellung eines Pflichten- und Lastenheftes
- B/2 Auslegung, Konstruktion und Bau der Einzelkomponenten zur Kraftübertragung
- B/3 Auslegung, Konstruktion und Bau der Einzelkomponenten zur Stromübertragung
- B/4 Recherche, Auslegung, Konstruktion und Integration eines Schnellverschlussystems für den Scheibenwechsel
- B/5 Aufbau und Inbetriebnahme der prototypischen Technikumsanlage mit TRL>7
- B/6 Schneidversuche und Darstellung der Robustheit und Leistungsfähigkeit der Technikumsanlage
- B/7 Schneiduntersuchungen zur Darstellung des TRL der Scheiben aus dem Komplex A
- B/8 Wirtschaftliche Betrachtung zu den Gesamtkosten

Arbeitsschritte Bereich C:

- C/1 Gesamtdokumentation zum Aufbau und Bedienung der Anlagentechnik und zur Herstellung und Qualität der Schneidscheiben
- C/2 Erarbeitung eines Anwendungsmerkblattes inklusive einer Gefährdungsbeurteilung zur Darstellung des erreichten TRL
- C/3 Beschreibung des Anwendungsprofils und Diskussion der Genehmigungsfähigkeit

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

- A/2 Verschleißschutzsysteme für die Scheibenwerkstoffe auf Draht- und Pulverbasis
  - Grobplanung der Recherchen zu den am Markt verfügbaren draht- und pulverförmigen Werkstoffen für die Herstellung der additiv gefertigten Scheiben in Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität, Institut für Werkstoffkunde
- B/1 Erstellung und Ausarbeitung eines Pflichten- und Lastenheftes
  - vorabgestimmte Arbeitsschritte bzw. Abstimmungen in Arbeit, basierend auf Informationen und den erforderlichen Randbedingungen aus den realen Anwendungsbereichen wurde gemeinsam mit dem UWTH erstellt

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Projektbereich A:

Weiterführung der Marktrecherche und Planungsausbau für die Verschleißschutzsysteme der Scheibenwerkstoffe auf Draht- und Pulverbasis.

Projektbereich B:

- Weiterführung des Pflichten- und Lastenheftes
- Erstellung und Entwicklung von 3D-Konstruktionsunterlagen zur Darstellung und Bewertung der Baustrukturen bzw. Einrichtungskomponenten
- Erstellung von CAD-Modellen zur weiteren Bewertung bezüglich Konstruktionsdetails einschl. der Fertigung von Mockups
- Abstimmung zur Übergabe von digitalen Konstruktionsdateien zur weiteren Verwendung innerhalb der Ausführungsplanung der Geräte- und Anwendungsspezifikation

Projektbereich C:

Noch nicht geplant.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden, 01062 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA); Teilvorhaben: Entwicklung von Werkzeugen zur In-Situ-Analyse von Betoneigenschaften, Radionukliden und hydraulischer Loch-zu-Loch-Permeabilität sowie Befundkartierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 bis 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.719.613,39 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Uwe Hampel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> uwe.hampel@tu-dresden.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Während der Beprobung der Betonstrukturen des Reaktorgebäudes im Kernkraftwerk Stade wurden Kontaminationen in der Betonkalotte, also dem unteren Teil des Reaktorsicherheitsbehälters, vorgefunden. Diese wurden durch Primärkreiswasser während des Anlagenbetriebes eingetragen. Es ist davon auszugehen, dass dieses Problem auch andere kerntechnische Anlagen in Deutschland und weltweit betrifft. Für den Rückbau der Betonstrukturen ist ein Ermitteln und Kartieren der Kontaminationen notwendig. Dies erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik durch Kernbohrungen und Laboranalysen des Bohrkernmaterials. Dabei schränken fehlende Zugänglichkeit, baustatische Randbedingungen und Kosten die Zahl der Beprobungsbohrungen ein. Eine Alternative zu Kernbohrungen sind Bohrungen ins Volle. Mit schmalen Bohrlöchern können deutlich mehr Bohrungen gesetzt werden, ohne die Baustatik zu gefährden. Da bei diesem Bohrverfahren keine Bohrkern für eine Analytik zur Verfügung stehen, müssen neue Mess- und Analysetechniken entwickelt werden. Im Verbundvorhaben werden Mess- und Analyseverfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Gesamtarbeitsplan des Verbundes sieht die folgenden vier Arbeitspakete (AP) vor.

AP 1: Entwicklung einer rohrgängigen Sonde zur tiefenaufgelösten Bestimmung von Dosisleistung, Feuchte u. Porosität:

- Vergleichende Bewertung von Impedanzspektroskopie u. Radartechnik
- Messung der Dosisleistung mittels OSL-Detektoren
- Entwicklung einer aktiven Sonde zur Bewertung des Strahlungsfeldes
- Auslegung, Konstruktion, Aufbau u. Erprobung der Messlanze
- Erprobung der Technik im Feld (KKS) u. Bewertung
- Iterative Verbesserung der Empfindlichkeit u. räumlichen Auflösung des Messverfahrens

AP 2: Entwicklung einer Methodik zur Betonbeprobung durch einen laserbasierten Betonabtrag an Bohrlochwand, pneumatischem Austrag des Aerosols u. In-Situ-Analyse der Radionuklide u. Bor:

- Vergleich verschiedener Abtragverfahren
- Entwicklung einer Sonde zur Probennahme in Betonrohren
- Abscheidung des Probenahmegutes
- Analyse des Betonabtrags als Funktion der Abtragstiefe im Bohrloch
- Vergleichsmessungen an realen Strukturen

AP 3: Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Loch-zu-Loch-Permeabilität mittels Tracergas:

- Konzepte zur Messung der hydraulischen Durchlassfähigkeit von Arbeitsfugen
- Permeationsversuche im Labormaßstab
- Realmaßstäbliche Versuche im KKS
- Analytische Modellierung u. Vorhersagemodell für die Durchlassfähigkeit vorgefundener Betonstrukturen

AP 4: Kartierung, elektronische Dokumentation, Beprobungsplanung, Wissensmanagement:

- Entwicklung eines Softwaremoduls zur Befundvisualisierung
- Elektronische Dokumentation
- Systematische Dokumentation informellen Rückbauwissens
- Übertragung der Ergebnisse auf weitere Rückbauvorhaben

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP 1: Für PBM hat die Doktorandin ihre Tätigkeit zum 01.12.2021 aufgenommen. Es wurden erste Literaturrecherchen zur Impedanzspektroskopie und Radartechnik durchgeführt. Es wurde ein Impedanzspektrometer bestellt und in Betrieb genommen. Am IKTP hat die Bearbeiterin Ihre Tätigkeit zum 01.10.2021 aufgenommen. Unter ihrer Betreuung wurde eine Bachelorarbeit eingereicht, in der das OSL-Verfahren in einem Betonphatton am IKTP untersucht wurde. Die Bachelorarbeit wurde Ende des Jahres eingereicht – die Verteidigung findet im Januar 2022 statt.

AP 2: Die Stellen des wissenschaftlichen und des technischen Mitarbeiters konnten bisher nicht besetzt werden. Die ersten Investitionen (Laser und Spezialoptiken) wurden vorbereitet und die Bestellungen ausgelöst.

AP 3: Der projektspezifisch anzustellende Sachbearbeiter wurde in einem Auswahlverfahren erfolgreich ermittelt. Er hat seine Tätigkeit zum 01.01.2022 aufgenommen. Haushaltsfinanziertes Stammpersonal hat das KOBKA Auftakttreffen am 04.11.2021 bestritten und erste Versuchsplanungen ausgearbeitet als Vorarbeit für eine möglichst zügige Einarbeitung des Sachbearbeiters. Dies beinhaltete insbesondere Vorüberlegungen zu Art, Geometrie und Anzahl der Betonproben für Laborversuche, die mit den Partnern PBM, WKET und VKTA abzustimmen sind. Teilkomponenten der partner-spezifischen Messtechnik wurden beschafft.

AP 4: Es wurden noch keine Tätigkeiten durchgeführt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 1: Die Literaturrecherche wird fortgesetzt. Für die Impedanzspektroskopie und Radartechnik werden COMSOL-Simulationen durchgeführt. Es erfolgt eine Verfahrensbewertung. Es wird mit dem Design der Messlanze begonnen. Am IKTP wird am 01.01.2022 ein weiterer Projektmitarbeiter die Tätigkeit aufnehmen, die bisherige Bearbeiterin wird die Stunden auf diesem Projekt reduzieren. Es beginnt der Aufbau einer Faser-Sonde.

AP 2: Voraussichtlich kann ab 01.02.2022 der wissenschaftliche Mitarbeiter seine Tätigkeit im Projekt aufnehmen. Er wird mit Literaturrecherche starten und mit dem Aufbau des Versuchstandes beginnen.

AP 3: Der Sachbearbeiter wird anhand eigenständiger Literaturrecherche und in Abstimmung mit den Projektpartnern die anzuwendenden Probekörpergeometrien, -zusammensetzungen und -mengen auslegen, was auch eine detaillierte Planung der Instrumentierung mit Messtechnik beinhaltet. Anschließend sollen Materialbeschaffung und Probekörperherstellung zeitnah ausgeführt werden.

AP 4: Es werden keine Tätigkeiten in den kommenden 6 Monaten geplant.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

derzeit keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.09.2021 – 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus Teilprojekt: Analytik für die Beprobung von Beton	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 – 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 151.739,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Verbundvorhaben KOBKA sollen Mess- und Analyseverfahren entwickelt werden, mit denen es möglich sein soll, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist. Der VKTA ist innerhalb des Projektes vorrangig bei der Betonanalyse bzw. dem Vergleich des Messsystems zur konventionellen Analytik im Labor beteiligt. Gleichzeitig ist der VKTA durch seine verfügbare Infrastruktur in der Lage, gezielt kontaminierte Betonprobekörper herzustellen.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

#### AP 2 Rohrgängiges Probenahmesystem zur In-situ-Analyse radioaktiver Kontamination im Beton und nuklidspezifischer Aktivitäten

AP 2.1 Vergleich verschiedener Abtragverfahren – Zuarbeit WKET (09/2021-02/2022)

AP 2.4 Analyse des Betonabtrages als Funktion der Abtragtiefe im Bohrloch (05/2023-04/2024)

AP 2.5 Vergleichsmessungen an realen Strukturen (03/2024-08/2024)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Bisher noch keine Arbeiten durchgeführt, Absprache mit WKET und IfB geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeit

Fortführung der oben genannten AP.

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine bekannt

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> PreussenElektra GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA); Teilvorhaben: Elektronische Ergebnisdokumentation, Beprobungsplanung und Wissensmanagement	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 bis 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 255.397,17 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Wolfgang Bertram	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> wolfgang.bertram@preussenelektra.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Während der Beprobung der Betonstrukturen des Reaktorgebäudes im Kernkraftwerk Stade wurden Kontaminationen in der Betonkalotte, also dem unteren Teil des Reaktorsicherheitsbehälters, vorgefunden. Diese wurden durch Primärkreiswasser während des Anlagenbetriebes eingetragen. Es ist davon auszugehen, dass dieses Problem auch andere kerntechnische Anlagen in Deutschland und weltweit betrifft. Für den Rückbau der Betonstrukturen ist ein Ermitteln und Kartieren der Kontaminationen notwendig. Dies erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik durch Kernbohrungen und Laboranalysen des Bohrkernmaterials. Dabei schränken fehlende Zugänglichkeit, baustatische Randbedingungen und Kosten die Zahl der Beprobungsbohrungen ein. Eine Alternative zu Kernbohrungen sind Bohrungen ins Volle. Mit schmalen Bohrlöchern können deutlich mehr Bohrungen gesetzt werden, ohne die Baustatik zu gefährden. Da bei diesem Bohrverfahren keine Bohrkern für eine Analytik zur Verfügung stehen, müssen neue Mess- und Analysetechniken entwickelt werden. Im Verbundvorhaben werden Mess- und Analyseverfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Gesamtarbeitsplan des Verbundes sieht die folgenden vier Arbeitspakete (AP) vor.

AP 1: Entwicklung einer rohrgängigen Sonde zur tiefenaufgelösten Bestimmung von Dosisleistung, Feuchte u. Porosität:

- Vergleichende Bewertung von Impedanzspektroskopie u. Radartechnik
- Messung der Dosisleistung mittels OSL-Detektoren
- Entwicklung einer aktiven Sonde zur Bewertung des Strahlungsfeldes
- Auslegung, Konstruktion, Aufbau u. Erprobung der Messlanze
- Erprobung der Technik im Feld (KKS) u. Bewertung
- Iterative Verbesserung der Empfindlichkeit u. räumlichen Auflösung des Messverfahrens

AP 2: Entwicklung einer Methodik zur Betonbeprobung durch einen laserbasierten Betonabtrag an Bohrlochwand, pneumatischem Austrag des Aerosols u. In-Situ-Analyse der Radionuklide u. Bor:

- Vergleich verschiedener Abtragverfahren
- Entwicklung einer Sonde zur Probennahme in Betonrohren
- Abscheidung des Probenahmegutes
- Analyse des Betonabtrags als Funktion der Abtragstiefe im Bohrloch
- Vergleichsmessungen an realen Strukturen

AP 3: Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Loch-zu-Loch-Permeabilität mittels Tracergas:

- Konzepte zur Messung der hydraulischen Durchlassfähigkeit von Arbeitsfugen
- Permeationsversuche im Labormaßstab
- Realmaßstäbliche Versuche im KKS
- Analytische Modellierung u. Vorhersagemodell für die Durchlassfähigkeit vorgefundener Betonstrukturen

AP 4: Kartierung, elektronische Dokumentation, Beprobungsplanung, Wissensmanagement:

- Entwicklung eines Softwaremoduls zur Befundvisualisierung
- Elektronische Dokumentation
- Systematische Dokumentation informellen Rückbauwissens
- Übertragung der Ergebnisse auf weitere Rückbauvorhaben

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

PreussenElektra ist im Verbundvorhaben an AP 4, sowie an AP 1 und 2 im späteren Verlauf beteiligt

Es wurden noch keine Tätigkeiten durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP 4: Übertragung der Ergebnisse auf weitere Rückbauvorhaben.

Es werden aufgrund der fortgeschrittenen Rückbausituation keine experimentellen Aktivitäten mehr im Kernkraftwerk Stade möglich sein. Maßnahmen sind in Vorbereitung, um auf eine andere Anlage auszuweichen, deren Rückbau noch nicht so weit fortgeschritten ist.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

derzeit keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9409A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen TP: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung in reaktornahen Bauteilen und deren Validierung an Experimenten als Basis der Aktivitätsrechnungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2018 bis 30.11.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 754.606,65 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jörg Konheiser	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> j.konheiser@hzdr.de

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundvorhabens ist es, eine standardisierte Methode zu entwickeln, die auf Basis der Leistungsgeschichte eines Kernreaktors die anlagenspezifische Aktivierung und deren zeitliche Veränderung für Reaktorkomponenten und reaktornahen Beton- bzw. Konstruktionselemente berechnet.

Damit ist eine zerstörungsfreie und frühzeitige radiologische Charakterisierung im Bereich der gesamten Reaktor Umgebung möglich, die für eine optimale Planung und Durchführung der Rückbaumaßnahmen benötigt wird. Dieses könnte wesentlich zu einer Minimierung des radioaktiven Abfalls und der Strahlenbelastung des Personals beim Rückbau beitragen. Die Methode wird am Beispiel eines Konvoi-Druckwasserreaktors entwickelt und an Experimenten validiert. Das Verbundprojekt besteht aus zwei Teilprojekten.

In diesem Teilvorhaben werden die dafür benötigten genauen 3D Neutronenfluenzrechnungen durchgeführt. Für solche Simulationen mit komplizierten Geometrien ist die Monte-Carlo Methode ein anerkanntes Verfahren. Zum Einsatz im Projekt kommt deshalb hauptsächlich das international viel verwendete Programm MCNP6. Für das Erstellen des Geometriemodells werden Originalkonstruktionsunterlagen verwendet. Als Referenzkraftwerk wird eine Vor-Konvoi Anlage genutzt. Die Neutronenquelle wird, basierend auf entsprechenden Leistungsgeschichten, als äußere Quelle vorgegeben. Die benötigten Daten dafür werden vom Betreiber bereitgestellt. Wegen der großen räumlichen Dimensionen muss ein Schwerpunkt der Arbeiten in der Optimierung der Simulation liegen. Die Nutzung von Varianzreduzierenden Methoden wird dabei unerlässlich sein.

Zur Validierung der Rechenergebnisse werden Neutronenfluenzmessungen auf Basis von Aktivierungsfolien im Referenzkraftwerk durchgeführt. Zusätzlich sind Messungen in anderen KKW geplant. An ausgewählten Stellen werden verschiedene Folien in Reaktornähe installiert und während eines Betriebszyklus bestrahlt. Die erzeugten Aktivitäten werden mit den Rechenergebnissen verglichen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Realisierung des Vorhabens erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP). AP 1 (teilweise), 2 und 3 werden in diesem und AP 4 und 5 im anderen Teilprojekt bearbeiten.

AP 1: Erstellung des Geometriemodells

AP 2: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung und deren Spektren

- Neutronenquelltermberechnungen
- Berechnung der Neutronenfluenzspektren für die Reaktoreinbauten, den Druckbehälter und die reaktornahen Bauteile

AP 3: Neutronenfluenzmessungen

Neutronenfluenzmessungen werden auf Basis von Aktivierungsfolien durchgeführt. In Absprache mit den Betreibern (PreussenElektra) werden an ausgesuchten und zugänglichen Stellen verschiedene Aktivierungsfolien installiert und innerhalb eines Zyklus bestrahlt. Mittels Gammaskopmetrie oder anderer Methoden werden die entstandenen Aktivitäten gemessen und zur Validierung der Rechnungen genutzt.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Die Arbeiten an der Erweiterung des Reaktormodells wurden fortgesetzt und gestalteten sich sehr aufwendig. Für einige Details mussten zusätzliche Unterlagen gesichtet werden. Außerdem wurde in einem Gespräch mit den KKW-Betreibern angedeutet, dass sich die zwei Referenzanlagen geometrisch unterscheiden könnten. Eine Überprüfung ergab aber, dass die Räume des ersten Kreislaufes mit seinen Haupteinbauten im Wesentlichen gleich sind und deshalb weiterhin ein Modell für beide Anlagen verwendet werden kann. Um den Bereich des Druckhalters und des Zwischenlagerbeckens im entwickelten 90° Modell richtig abbilden zu können, wurden zwei Modelle entwickelt, die die Unterschiede bei 0° bzw. 180° abbilden. Aus Varianzgründen wurde die Entwicklung eines 180° Modell nicht in Betracht gezogen.

AP 2: Auf Basis aktualisierter Leistungsdaten wurden für die Referenzanlage 1 neue Quelldaten berechnet und dem Projektpartner übergeben. Entsprechend wurden auch neue Quellen für den Vergleich von Rechnung zu Experiment bestimmt. Parallel dazu wurde für die zweite Anlage vergleichbares durchgeführt. Wie bei den anderen Zyklen wurden für die kurzlebigen Monitore separate Quellen erzeugt, die die Veränderung der Verteilung innerhalb des Zyklus berücksichtigen.

Die Neutronenfluenzen und die daraus resultierenden Aktivierungen sind für den zweiten Satz von Monitoren aus dem Referenzkraftwerk 2 berechnet und mit den erhaltenen Messergebnissen verglichen worden. Es wurden gute bis sehr gute Übereinstimmungen erzielt. Das bedeutet, dass die Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Aktivitäten für die meisten Monitore kleiner als 50% und für einige kleiner als 10% sind. Die Ergebnisse bestätigen die Resultate aus dem ersten Vergleich und zeigen, dass sowohl die Neutronenquelle (im Reaktorkern) als auch das geometrische Modell annähernd korrekt abgebildet sind.

AP 3. Im Oktober 2021 wurden im Referenzkraftwerk 2 ca. 80 Monitorsätze entnommen und die Aktivierungen mittels Gammaskopmetrie bestimmt. Für den letzten Arbeitszyklus dieses KKW wurden noch einmal ca. 150 Monitorsätze platziert. Dabei wurden an den kernferneren Positionen nur Zn, Sn, In und Ta eingesetzt, da diese die höchsten Aktivierungen aufweisen. In fast allen Positionen wurden größere Metallplättchen eingesetzt, um eine höhere und damit leichter messbare Aktivierung zu erhalten.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP 1: Abschluss der Modellentwicklung und Durchführung entsprechender Testrechnungen.

AP 2: Neutronenflussrechnungen für das erweiterte Modell werden durchgeführt und die entsprechende Aktivierung der Monitore bestimmt. Der Fokus liegt dabei auf dem Vergleich mit den Aktivitäten von den Monitoren, die außerhalb des äußeren biologischen Abschirmung platziert sind.

Nach Beendigung der Zyklen werden die Quellen für die Referenzanlagen berechnet, anschließend entsprechende Neutronenflussrechnungen und deren Validierung an den Experimenten durchgeführt.

AP 3: Im Februar 2022 werden letztmalig die Monitorsätze aus dem jetzt abgeschalteten Referenzkraftwerk 1 entnommen und die Aktivitäten mittels Gammaskopie und LSC bestimmt.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

WERREBA Projekt

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

R. Rachamin, J. Konheiser, A. Barkleit, S. Marcus, "Decommissioning Studies of German PWR: Neutron Fluence Calculations and Experimental Measurements", Proc. of 15th International Symposium "Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes", Dresden, Germany, August 25-27, 2021.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9409B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWTH Aachen, Institut für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenflussverteilungen – EMPRADO Teilprojekt: Entwicklung und Anwendung einer Methode zur genauen Berechnung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2018 bis 30.11.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 694.085,52 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Frank Charlier / Prof. Dr. R. Nabbi	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> charlier@els.rwth-aachen.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundvorhabens ist es, eine standardisierte Methode zu entwickeln, die auf Basis der Leistungsgeschichte eines Kernreaktors die anlagenspezifische Aktivierung und deren zeitliche Veränderung für Reaktorkomponenten und reaktornahen Beton- bzw. Konstruktionselemente berechnet. Damit wäre eine zerstörungsfreie und frühzeitige radiologische Charakterisierung von Gebäudeteilen im Bereich des Reaktorkerns möglich. Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Bestimmung des aus der Aktivierung resultierenden Strahlenfelds, welches schließlich den radiologischen Status einer Rückbaumaßnahme definiert und einen zentralen Aspekt beim Rückbau eines Kernreaktors darstellt.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgt drei wesentliche Ziele:

- Minimierung des radioaktiven Abfalls durch detaillierte Quantifizierung und Charakterisierung bereits vor dem Rückbau.
- Optimierung der Strahlenschutzmaßnahmen zur Minimierung der Strahlenbelastung des Personals beim Rückbau und der Entsorgung.
- Optimale Planung und Durchführung von Rückbaumaßnahmen.

Der Titel des Teilprojektes der RWTH Aachen lautet:

Entwicklung und Anwendung einer Methode zur genauen Berechnung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Realisierung des Verbundvorhabens erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP). Die AP 4 und 5 werden im Teilprojekt 2 der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS) und AP 2 und 3 im anderen Teilprojekt bearbeitet durch das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR), Institut für Ressourcenökologie (IRE). Die Durchführung des AP1 erfolgt durch die beiden beteiligten Institute.

- AP 1: Erstellung des Geometriemodells
- AP 2: Berechnung der Neutronenflussverteilung und deren Spektren
  - 2.1: Neutronenquelltermberechnungen
  - 2.2: Berechnung der Verteilung
- AP 3: Neutronenflussmessungen zur Modellvalidierung

- AP 4: Berechnung der Aktivitätsverteilung
  - 4.1: Erstellung anlagenspezifischer Aktivierungsquerschnittsdateien
  - 4.2: Berechnung der Aktivitätsverteilung in den einzelnen Strukturen
- AP 5: Bestimmung der Ortsdosisleistungsverteilung (ODL)
  - 5.1: Bestimmung der Energie- und ortsabhängigen Strahlenquellterme
  - 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### AP 4.1: Erstellung Datenbibliothek für Aktivierungswirkungsquerschnitte

Die im Rahmen von AP-4.1 geplanten Arbeiten sind bereits vor diesem Berichtszeitraum wie vorgesehen durchgeführt worden und sind somit abgeschlossen.

#### AP 4.2: Berechnung der 3D-Aktivitätsverteilung

Für die VOR-KONVOI Anlage sind weitere detaillierte 3D-Aktivierungsberechnungen und Vergleichsrechnung mit dem internationalen Programmsystem SCALE durchgeführt worden. Die Vergleichsrechnungen dienen zur Verifizierung und Qualitätsprüfung der Ergebnisse der nuklidspezifischen 3D-Aktivierungsberechnungen. Diese berücksichtigten die Komponenten einschließlich des inneren biologischen Schilddrüsens der Anlage. Der Vergleich der nuklidspezifischen Aktivierungsergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung der Aktivitätswerte für die rückbaurelevanten Radionuklide Co-60, Ni-63 (RDB) und Eu-152 (innere biologische Schilddrüse). Dazu wurden im vergangenen Berichtszeitraum Vorbereitungen zur 3D-Aktivierungsberechnung des Anlagentyps KONVOI getroffen. Diese betrafen die Bestimmung der effektiven Betriebsdauer und die Ermittlung der Zusammensetzung der aktivierungsrelevanten Bestandteile der Strukturmaterialien.

#### AP 5.1: Bestimmung der Verteilung der Strahlungsquellterme

Die im Rahmen von AP-5.1 geplanten Arbeiten sind bereits vor diesem Berichtszeitraum wie vorgesehen durchgeführt worden und sind somit abgeschlossen.

#### AP 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung

Im Berichtszeitraum wurden unter Zugrundelegung des entwickelten 3D Geometrie- und Strahlentransportmodells (VOR-KONVOI-Anlage) und der bauteilbezogenen  $\gamma$ -Emissionsspektren die ersten Testsimulationen mit dem Rechenprogramm MCNP durchgeführt. Anschließend erfolgte als erstes die Berechnung der  $\gamma$ -Fluss- und ODLs-Verteilung im gesamten Anlagenmodell als Beitrag der spektralen Strahlung des Reaktordruckbehälters (RDB). Nach der Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte die Simulation des Strahlungseffekts eines weiteren aktivierten Bauteils der Anlage (VOR-KONVOI). Diese Komponentenweise Strahlenfeldberechnung resultiert daraus, dass sich die Bandbreite der spektralen Quellterme der einzelnen Segmente über mehrere Größenordnungen voneinander unterscheiden. Deshalb wurde für die Strahlentransportberechnungen das additive Verfahren gewählt, um innerhalb der spektralen Verteilung des integralen Gammaflusses (Entscheidend für die ODLs-Verteilung) eine hohe Simulationseffizienz und Rechengenauigkeit zu erzielen.

## **4. Geplante Weiterarbeiten**

### **AP 4.1: Erstellung Datenbibliothek für Aktivierungsberechnungen**

Diesbezüglich sind im nächsten Berichtszeitraum keine weiteren Arbeiten geplant.

### **AP 4.2: Berechnung der 3D-Aktivitätsverteilung**

Die geplanten Arbeiten für dieses Arbeitspaket unterteilen sich in die Verifizierung der Aktivierungsergebnisse der VOR-KONVOI Anlage und der 3D-Aktivierungsberechnung für die KONVOI-Anlage. Für die Code-by-Code Validierung und weitere Qualitätsüberprüfung der Aktivierungsergebnisse sind für den nächsten Berichtszeitraum zusätzliche Vergleichsrechnungen mit dem internationalen Programmsystem SCALE für die äußeren Strukturen geplant. Diese fokussieren sich auf Bereiche des äußeren biologischen Schildes, da in diesem Bereich Abweichungen der nuklidspezifischen Aktivitätsergebnisse möglich sind. Durch die durchgeführten simulationstechnischen Vorbereitungen zur 3D-Aktivierungsberechnung für eine weitere Anlage (KONVOI) hinsichtlich der Bestrahlungsdauer und aktivierungsrelevanten Bestandteile der Strukturmaterialien, ist für das nächste Halbjahr die 3D-Aktivierungsberechnung der gesamten Anlage geplant. Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden nach Abschluss der Berechnungen und Auswertung der Ergebnisse die Generierung von 3D Aktivierungsatlanten (unter dem Einsatz der bestehenden Visualisierungsroutine), welche die Grundlage für die Optimale Planung und Realisierung von Rückbaumaßnahmen sind, unternommen. Darüber hinaus werden Vorbereitungen zur Erstellung des Projektberichts getroffen.

### **AP 5.1: Bestimmung der Verteilung der Strahlungsquellterme**

Als Gegenstand dieses Arbeitspakets für die unter Berücksichtigung der beantragten Laufzeitverlängerung im 1. Halbjahr 2023 beginnende Projektphase ist die Berechnung der Verteilung der Spektralen Quellterme im Gesamtmodell einer weiteren DWR-Anlage des Typs KONVOI geplant (unter Anwendung des bisherigen Rechenverfahrens). Die dabei entstehenden Ergebnisse bilden die Datengrundlage für die Berechnung der Verteilung des Gamma-Flusses und der ODL für den KONVOI-Reaktor, in dessen Rechenmodell die Materialzusammensetzung und Fluenzwerte von denen der bereits berechneten VOR-KONVOI-Anlage unterscheiden. Nach Fertigstellung und unter Zugrundelegung dieser Dateien werden Strahlentransportberechnungen mit dem Rechenmodell der 2. Anlage durchgeführt (im Rahmen des AP-5.2).

### **AP 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung**

Als Gegenstand dieses AP wird in der künftigen Projektphase (Beginnend 1.1.2023) zunächst ergänzende Strahlentransportberechnungen (Programm MCNP) durchgeführt, um die Beiträge der restlichen Anlagenteile zum Strahlenfeld (Gammafluss und ODL) im gesamten Modell der VOR-KONVOI-Anlage zu bestimmen. Nach der Auswertung der Ergebnisse erfolgt die Bestimmung des integralen Strahlenfelds der Anlage durch die additive und gewichtete Kombination der Datenfelder. Darüber hinaus wird in derselben Projektphase unter dem Einsatz der existierenden Visualisierungsroutine die Generierung von 3D ODL-Atlanten unternommen, welche die Grundlage für die Optimale Planung und Realisierung von Strahlenschutz- und Rückbaumaßnahmen sind. Des Weiteren ist die Berechnung der Verteilung der ODL und des Gamma-flusses für eine 2. Anlage (KONVOI) geplant, welche unter Zugrundelegung der generierten Quelltermdateien (aus AP-5.1) und Anwendung des Simulationsverfahrens erfolgt.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es handelt sich hierbei um das Teilprojekt eines Verbundprojekts, im Rahmen dessen wechselseitiger Bezug zwischen den Teilprojekten besteht.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

M. Nolden, et al. „Radiologische Charakterisierung von Kernreaktoren für den Rückbau“  
KONTEC-2021, August, Dresden

A. Scaramus et al. “Radiological Characterization of a German PWR: Development and application of a high-dimensional method for activity analysis and dose rate calculation”  
Jahrestagung „Strahlenschutz und Entsorgung“,  
Sept. 2021, Aachen

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9412
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Wege zum effizienten Rückbau von Reaktorkomponenten und Betonabschirmung: Berechnung des Aktivitätsinventars und deren Validierung an Bohrkernen sowie Mobilitätsuntersuchungen von Radionukliden (WERREBA)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.188.478,25 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jörg Konheiser	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> j.konheiser@hzdr.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Vorhabens ist es, genaue Kenntnisse über die entstandenen radioaktiven Nuklide während des Leistungsbetriebs eines Kernkraftwerkes, die zeitliche Veränderung der Aktivität und die daraus resultierende Verteilung der Aktivität in den einzelnen Phasen des Rückbaus zu erhalten. Die Aktivitätsverteilungen sollen dabei anlagenspezifisch für den Reaktordruckbehälter (RDB), dessen Einbauten, den Reaktordeckel und die erste Betonabschirmung (biologisches Schild) bestimmt werden. Dabei liegt der Schwerpunkt besonders auf der experimentellen Bestimmung der Nuklidzusammensetzung, deren Aktivität und chemischen Bindung im Material. Die Untersuchungen werden an Originalmaterial sowohl aus dem RDB als auch aus dem Beton durchgeführt und dienen der Validierung und Verifizierung der durchgeführten Rechnungen.

Im Fall der stark aktivierten Reaktorkomponenten könnten den Behörden und Betreibern Informationen bereitgestellt werden, ob neben der direkten Zerlegung die Methode der Abklinglagerung als eine ökologische und wirtschaftliche Alternative in Betracht kommt. Mit einer möglichen Zwischenlagerung könnten sowohl die endzulagernde aktive Abfallmenge reduziert als auch wertvolle Metalle wieder recycelt werden. Zusätzlich wird die Strahlenbelastung für das Rückbaupersonal verringert.

Im Fall der Betonabschirmung werden Aussagen für einzelne Nuklide zu ihrer möglichen chemischen Mobilität getroffen, welche direkten Einfluss auf die Rückbaustrategie und die Endlagerung hat. Denn für beides ist nicht nur die absolute Menge, sondern auch die strukturelle Einbindung der Radionuklide im Beton wichtig. Diese ist entscheidend für die Stabilität der Bindung der Radionuklide im Beton und damit für den Umfang und die Kinetik möglicher Auflösungen mit Übergang in die wässrige Phase während des Rückbaus und im Endlager. Deshalb soll neben der radiologischen auch eine physiko-chemische Charakterisierung wichtiger Nuklide im Material erfolgen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 1.: Extraktion von Proben aus dem RDB/Reaktordeckel/Betonabschirmung

AP 2.: Experimentelle Bestimmung der Aktivitäten

AP 3.: Strukturelle Charakterisierung des Radionuklidinventars

AP 4.: Berechnung der Neutronenfluenz- und Aktivitätsverteilungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Alle geplanten Betonbohrkerne von EWN aus Greifswald sind entnommen, gekennzeichnet und dokumentiert worden (Gewicht, Länge und Anzahl der Bruchteile).

AP 2: Die Aktivierung von Betonproben, welche im Rahmen des EMPRADO-Projektes in einem Kernkraftwerk während je eines halben und eines ganzen Zyklus bestrahlt wurden, wurde mittels Gammaskopie untersucht. Neben den typischen Radionukliden Co-60, Eu-152, Eu-154 und Ba-133 wurden auch Sc-46, Mn-54, und Fe-59, welche aus den Spurenelementen Ti, Ni und Fe gebildet werden, quantitativ bestimmt. Der Gehalt aller im Beton enthaltenen chemischen Elemente wurde mittels ICP-MS quantitativ analysiert.

An weiteren ausgewählten RDB-Proben der Blöcke 1 und 2 wurden die Co-60-Aktivitäten mittels Gammaskopie und die C-14-Konzentrationen durch oxidative Verbrennung und anschließende LSC-Messung bestimmt. Die Massenkonzentrationen aller enthaltenen chemischen Elemente in den Stahlproben wurden mittels OES-Messungen bestimmt.

AP 3: Zeta-Potentialmessungen und Auflösungsversuche an Quarz wurden innerhalb einer Bachelorarbeit umfangreich untersucht. Die für 6 Monate bestrahlte Betonprobe ist mittels XRD,  $^{29}\text{Si}$ - und  $^{27}\text{Al}$ -MAS-NMR- und  $\mu$ -Raman-Spektroskopie charakterisiert worden. Die Ergebnisse zeigen eine Mineralphasen-Heterogenität der Proben, die auf die Partikelgrößenverteilung zurückzuführen ist. Es konnten mit diesen Methoden keine strukturellen Veränderungen durch die Aktivierung festgestellt werden. Andere Mineralproben wurden zum Vergleich mit Si-Ionen (Fluenz:  $5 \cdot 10^{14}$  Ionen/cm<sup>2</sup>) bestrahlt. Die Proben wurden nach der Bestrahlung mit VSI und EBSD-REM untersucht und die erwartete Volumen-Ausdehnung konnte festgestellt werden.

Ausgewählte RDB-Proben wurden poliert und für Rasterelektronenmikroskopie, Röntgenspektroskopie (REM/EDX) bzw. VSI-Interferometrie-Messungen vorbereitet. Die REM-/EDX-Aufnahmen zeigen die mikrostrukturellen Merkmale der aktivierten Stahlproben. Darüber hinaus wurde die chemische Zusammensetzung der Einschlüsse in den Stahlproben ermittelt.

AP 4: Das MCNP-Geometriemodell wurde erweitert. Das betrifft insbesondere den Bereich des Reaktordeckels. Die MCNP-Vergleichsrechnungen für Probenpositionen im Reaktordruckbehälter mit großem Abstand zur Spaltzone ergaben keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den gemessenen Aktivitäten, weshalb weitere Untersuchungen erforderlich sind. Mit MCNP wurden Rechnungen für den Reaktordeckel und Beton begonnen; der Fokus liegt auf der Reduzierung der erforderlichen Rechenzeiten (Einsatz varianzreduzierender Maßnahmen).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP 1: ist abgeschlossen.

AP 2: Von weiteren Beton- und Stahlproben sollen die chemischen Zusammensetzungen mittels ICP-MS bzw. OES und die Aktivitäten mittels Gammaskopie und LSC bestimmt werden.

Eine modifizierte Methode des Königswasser-Aufschlusses mit Hilfe von Mikrowellen soll für die den LSC-Messungen vorausgehende radiochemische Abtrennung von Fe-55, Ni-63, Co-60 und Ca-41 entwickelt und etabliert werden. Diese Methode soll sowohl für die Beton- als auch für die Stahlproben zur Anwendung kommen.

AP 3: Um die Ausdehnung der Elementarzelle von Quarz sehr akkurat zu bestimmen, sollen Synchrotron XRD-Messungen an bestrahlten und unbestrahlten Betonproben an der ROBL-Beamline der ESRF in Grenoble durchgeführt werden. Außerdem werden bestrahlte Betonproben mittels EPR-Spektroskopie auf Defekte in der Kristallstruktur untersucht. Es ist geplant, das Auflösungsverhalten von bestrahlten und unbestrahlten Mineralien mit VSI und EBSD-REM zu untersuchen.

Für die Charakterisierung der Oberflächenstruktur der aktivierten Stahlproben sind weitere VSI-Interferometrie-Messungen geplant.

AP 4: Die Strahlungstransport-Rechnungen für die Probenpositionen in Reaktordruckbehälter, Reaktordeckel und Beton werden fortgeführt.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

EMPRADO Projekt

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Richard Lessing: Untersuchung der Oberflächenladung von Quarz zur Betrachtung der Auflösungskinetik vor dem Hintergrund der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden, 2021.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hellma Materials GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, Teilprojekt: Gerätebau und -entwicklung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 534.371,87 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Sibylle Petrak	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Sibylle.Petrak@hellma.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Das Teilprojekt Gerätebau und -entwicklung hat zum Ziel, einen Prototypen eines kollimationsfreien, richtungsaufgelösten In-situ Gammaspektrometers in zwei Ausführungsmodellen herzustellen. Der Prototyp soll einerseits die Zusammensetzung der Kontamination (das Radionuklidgemisch) und die Höhe der Kontamination feststellen und andererseits die räumliche Verteilung mit einem bildgebenden Verfahren bestimmen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm (im Berichtszeitraum)

### AP 1 Planung und Entwurf

#### a. Entwicklung Anforderungs- und Messkonzept (6/2021-11/2021)

- 1.1 Experimente mit Strahlungsdetektoren (7/2021-11/2021)
- 1.2 Spezifizierung 3D-Laserscanner (7/2021-11/2021)
- 1.3 Grob-Spezifizierung für 2 Geräte inkl. Kostenvoranschlag (8/2021-11/2021)

### AP 2 Simulation, Modellierung

- 2.2 Aufbereitung der Messdaten aus 1.2 (12/2021-3/2022)
- 2.5 Untersuchung der Simulationsdaten (9/2021-7/2022)

### AP 3 Aufbau Messsysteme

- 3.1 Vollständige Spezifizierung für 2 Geräte (12/2021-1/2022)
- 3.2 Gerätefertigung (1/2022-7/2022)
- 3.3 Einrichtung Messplatz inkl. Strahlenschutzzulassung (12/2021-7/2022)
- 3.4 Inbetriebnahme der Elektronik, Kontrollmessungen (2/2022-7/2022)
- 3.5 Softwareinstallation Gammaspektrometrie (3/2022-8/2022)
- 3.6 Softwareprogrammierung LabView (4/2022-11/2022)
- 3.7 Aufbau und Inbetriebnahme 3D-Laserscanner (5/2022-9/2022)
- 3.8 Systemintegration (7/2022-11/2022)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Abgeschlossene Programmpunkte:

AP 1.1

Laufende Programmpunkte:

AP 1.2, 1.3, 1.4, 2.2, 2.5, 3.1, 3.3, 3.5

Erstellte und an Projektpartner übermittelte Projektberichte:

- Deliverable D3: Definition der Detektorgruppen
- Deliverable D9: Nuklidspezifische Systemmatrix RSL7
- Deliverable D10: Energieabhängige Systemmatrix RSL7
- Deliverable D10-A1: Energieabhängige Systemmatrix RSL2

Durchgeführte Projektmeetings (als Videokonferenzen):

- Kickoff Meeting am 22.7.21
- 2. Projektmeeting am 11.10.21

Für das Projekt getätigte Investitionen:

- Materialentnahme für Kristallzucht
- SODIGAM Gammaskpektrometrie-Software
- Detektorelektronik (Hochspannungsversorgung, 8-Kanal Digitizer und Zubehör)
- Wolframelektroden (Strahlungsquelle zum Kalibrieren der Detektoren)

Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse:

In AP 1.1 wurden acht Gerätevarianten spezifiziert, die auf ihre Eignung bezüglich des Anforderungs- und Messkonzepts untersucht werden sollen. Jede Gerätevariante besteht aus einer Detektorgruppe mit bis zu acht Detektoren. Die Detektormaterialien fallen in zwei Gruppen: PVT-Szintillatoren bzw. Cerbromid-Kristalle.

Für jede Gerätevariante wurde die Messwerterfassung definiert; diese umfasst eine bestimmte Anzahl von Messkanälen von Koinzidenzereignissen. Die Geräte haben zwischen 6 bis 22 Messkanäle. Jeder Kanal ist einem Paar von Detektoren zugeordnet, die kombinatorisch aus der Gruppe von Detektoren gebildet werden. Das Messkonzept stellt eine Erweiterung der Compton-Kamera dar. Im Unterschied zur Compton-Kamera ist keine Einteilung der Detektoren in Streu- bzw. Absorptionsdetektoren erforderlich. Mit den in Deliverable D3 definierten Messkanälen werden mehr Ereignisse der Auswertung zugänglich gemacht als bisher in einer Compton Kamera üblich ist. Zu jeder Gerätevariante gibt es ein physikalisches und mathematisches Modell, das in AP 2 verwendet werden kann.

Die für die Geräte benötigten Cerbromid-Kristalle (AP 3.2) befinden sich in der Züchtung. Die Detektorelektronik wurde spezifiziert und bestellt, der Liefertermin ist am 21.2.22. Die für das Gerät benötigte Gammaskpektrometrie-Software (SODIGAM) wurde bestellt und installiert. Derzeit werden am firmeninternen Messplatz aufgezeichnete Gammaskpektren verschiedener Strahlungsquellen mit SODIGAM ausgewertet.

Ein weiterer Beitrag zu AP 1.1 war die Ausarbeitung geeigneter physikalischer Variablen, welche die Richtungsinformation von Koinzidenzereignissen geeignet abbilden können. Dabei wird zwischen uni- und bidirektionalen Messkanälen differenziert, die sich bezüglich der

Zusammenstellung von Detektormaterialien unterscheiden. Paare aus einem PVT- und einem Cerbromid-Detektor werden als unidirektional, Paare aus zwei Cerbromid-Detektoren als bidirektional bezeichnet.

In unidirektionalen Messkanälen wird der von Compton Kameras bekannte Compton-Winkel als Messgröße verwendet. Für bidirektionale Messkanäle wurde eine neue physikalische Größe eingeführt, die als Compton Pseudowinkel bezeichnet wird. Der Compton Pseudowinkel  $\vartheta_{pseudo}$  ist als Funktion  $\vartheta_{pseudo}(E_1, E_2)$  von zwei Energiewerten  $E_1, E_2$  definiert, wobei  $E_1, E_2$  die Energiedepositionen in beiden an der Koinzidenz beteiligten Detektoren sind. Für Strahlungsenergien kleiner als 255 keV ( $mc^2/2$ ) ist der Compton Pseudowinkel  $\vartheta_{pseudo}$  identisch mit dem Einfallswinkel der Gammastrahlung; für Energien größer als 255 keV stellt er lediglich eine Näherungslösung dar. Die Näherungslösung ist hinreichend gut, um damit eine Gammakamera betreiben zu können. Auf dieser theoretischen Grundlage ist es möglich, eine Gammakamera zu realisieren, die über die bisher bekannte Funktionalität einer Compton Kamera hinausgeht.

Die Ergebnisse von AP 1.1 fließen in die Arbeiten zu AP 2.5 ein, die sich mit Monte Carlo Simulationen für die Gerätevarianten beschäftigen. Für die simulierten Ereignisse werden die jeweiligen physikalischen Größen, d.h. der Compton Winkel bzw. der Compton-Pseudowinkel berechnet und in geeigneten Tabellen, sogenannten Systemmatrizen, erfasst. Als Ergebnis wurde ein mathematisches Modell für das Ansprechverhalten von uni- und bidirektionalen Messkanälen auf Gammastrahlung ausgearbeitet, das den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurde. Das Modell kann später in der Geräte-Software (AP 2.6) implementiert werden.

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die Arbeiten zu den Programmpunkten 1.2, 1.3 und 1.4 sind weitgehend abgeschlossen und sollen in Bälde fertiggestellt werden. Mit den Arbeiten in den Programmpunkten 2.2, 2.5, 3.1, 3.3 und 3.5 wurde begonnen, hier wird der inhaltliche Schwerpunkt im nächsten Halbjahr liegen. Im Anschluss werden die Arbeiten in den Programmpunkten 3.2, 3.4 und 3.6 aufgenommen.

Das nächste Projektmeeting wird folgende Schritte der Projektkoordination umfassen:

- Abstimmung zu Versuchsvorschlägen der HSZG am Versuchsstand „VS Castor“
- Abstimmung zu Experimenten mit Einzeldetektoren
- Abstimmung der FLUKA Simulationsdurchläufe mit der HSZG
- Abstimmung zu Algorithmen und benötigten Datensätzen mit FAU

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, Teilprojekt Bildrekonstruktionsverfahren	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 321.192,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Martin Burger	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Martin.burger@fau.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radionuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann. Zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Kontamination sind neuartige Algorithmen der Signalverarbeitung erforderlich, die im Teilprojekt Bildrekonstruktionsverfahren von der Arbeitsgruppe von Prof. Martin Burger an der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) entwickelt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 2 Simulation, Modellierung

- a. Konzeptionierung verschiedener Imaging Techniken (6/2021-11/2021)
- 2.6 Modell- und Algorithmenentwicklung (8/2021-9/2022)

AP 3 Aufbau Messsysteme

- 3.6. Softwareprogrammierung Bildrekonstruktion (3/2022-11/2022)

AP 4 Labormessungen, Versuchsreihen

- 4.4. Fertigstellung der Bildrekonstruktions-Software (9/2022-7/2023)
- 4.5 Datenfusionierung mit Laserscanner Pointcloud (2/2023-8/2023)

AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

- 5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (8/23-2/24)

AP 6 Workshop & Dokumentation

- 6.1 wissenschaftliche Bewertung & Dokumentation (1/2024-5/2024)
- 6.3. Planung, Durchführung, Auswertung Workshop (12/2023-5/2024)
- 6.4. Abschlussbericht (2/2024-5/2024)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 2.1 wurde abgeschlossen, es wurde ein Überblick über die verschiedenen, für die Anwendung in Compton-Kameras geeigneten Imaging-Techniken und die mathematischen Hintergründe ausgearbeitet.

Mit dem verwandten AP 2.6 wurde begonnen. Verschiedene erste Rekonstruktions-Algorithmen wurden ausgearbeitet und zur Testung als MATLAB-Programme umgesetzt, bspw. MLEM-Verfahren in bin- und list-mode Einstellungen sowie verschiedene Formulierungen als Variationsprobleme, wofür wir uns mit Hellma über geeignete regularisierende Terme im Labor- und im Anwendungsfall abgestimmt haben. Diverse Rekonstruktionsverfahren wurden erfolgreich an verschiedenen Typen von Daten (erst durch Vorwärtsmodell erzeugt, später dann aus separaten Monte-Carlo-Simulationen erzeugte sowie von Hellma bereitgestellte frühere Messdaten) getestet.

Mit der Programmierung und Testung der Algorithmen in MATLAB wurde implizit bereits mit AP 3.6 begonnen.

Ergänzend zu bekannten mathematischen Modellen für existierende Compton-Kamera-Systeme wurden Aufbauten modelliert, in welchen Szintillationskristalle gleichzeitig als Streu- und als Absorptionskomponenten verwendet werden können und somit bidirektionale Streuprozesse in der Kamera erlauben. Erste Rekonstruktionen für ein einfaches Modell wurden erfolgreich an simulierten Daten durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die bestehenden Algorithmen werden verbessert und an die zu erwartenden Anwendungsfälle sowie das noch abschließend zu planende Gerät angepasst. Sobald die Rekonstruktionsalgorithmen für Anwendungsfälle fertiggestellt und ausreichend getestet sind, wird die entsprechende Software aus Kompatibilitätsgründen von MATLAB in die Programmiersprache C übertragen, was weitere Tests und Optimierung erfordert. Dieser Abschnitt ist AP 3.6 zuzuordnen.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Austausch über die Modellierung des geplanten Compton-Kamera-Systems mit Hellma wurden verschiedene Möglichkeiten und potenzielle Vorteile davon diskutiert, Kameras mit Kristallen in den Streu- und in den Absorption-Komponenten auszustatten (statt wie bisher nur in den Absorptionsteilen). Eine publizierte Modellierung dieses Aufbaus ist bisher nicht bekannt, weshalb eine gemeinsame Veröffentlichung zu dem Thema geplant ist. Im Anschluss und nach weiterer Untersuchung ist eine weitere Publikation zu den mathematischen Eigenschaften des assoziierten inversen Problems vorgesehen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hochschule Zittau/Görlitz	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, Teilprojekt C Experimentelle Untersuchungen und Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 413.046,00 € (inkl. PP)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Thomas Schönmuth	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> T.Schoenmuth@hszg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radionuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann.

Im Teilprojekt C werden von der Hochschule Zittau/Görlitz experimentelle Untersuchungen und eine Simulation zu den SPCC Demonstratoren durchgeführt. Die Simulation mit dem Programm FLUKA unterstützt die Planungs- und Entwurfsphase der SPCC Demonstratoren. Die HSZG stellt Versuchsmatrizen für die geplanten Messungen auf, die anschließend im Labor Strahlentechnik der HSZG durchgeführt und ausgewertet werden. Außerdem unterstützt die HSZG den Projektpartner Hellma bei der Auswahl, dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines für kerntechnische Anlagen geeigneten 3D Laserscanners.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1 Planung und Entwurf

- 1.4 Entwicklung Anforderungs- und Messkonzept (6/2021-11/2021)
- 1.3 Spezifizierung 3D-Laserscanner (7/2021-11/2021)
- 1.5 Planung AP 4 und AP 5 (8/2021-11/2021)

### AP 2 Simulation, Modellierung

- 2.3 Festlegung Nuklidvektoren (8/2021-3/2022)
- 2.4 FLUKA Detektor-Simulation (6/2021-7/2022)
- 2.5 Untersuchung der Simulationsdaten (9/2021-7/2022)

### AP 3 Aufbau Messsysteme

- 3.7 Aufbau und Inbetriebnahme 3D-Laserscanner (5/2022-9/2022)
- 3.8 Systemintegration (7/2022-11/2022)

AP 4 Labormessungen, Versuchsreihen

- 4.2 Aufstellung von Versuchsmatrizen HSZG (10/2022-11/2022)
- 4.3 Durchführung und Auswertung Versuchsreihen HSZG (12/2022-8/2023)

AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

- 5.2 Unterstützung der Validierungsmessungen am VKTA (7/2023-2/2024)
- 5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (9/2023-2/2024)

AP 6 Workshop & Dokumentation

- 6.1 Wissenschaftliche Bewertung & Dokumentation (1/2024-5/2024)
- 6.3 Planung, Durchführung, Auswertung Workshop (12/2023-4/2024)
- 6.4 Abschlussbericht (3/2024-5/2024)

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

Zu AP 1.1

Es wurde ein Positionierungssystem für vorhandene radioaktive Quellen ausgewählt, welches auf einen Versuchstand (VS CASTOR) aus dem Projekt DCS-Monitor (BMW-Vorhaben: 1501518B) basiert. Dieser Versuchstand kann bis zu 8 einzelne radioaktive Quellen aufnehmen, die mit einem minimalen Abstand von je 15 mm positioniert werden können. Die 8 Quellenaufnahmen sind an Lineareinheiten gekoppelt, die einzeln über eine Gesamthöhe von 955 m stufenlos verfahrbar sind. Der Versuchstand ist auf Laufrädern montiert, so dass die Lage im Strahlenlabor (Entfernungen, Höhen, Winkel zu den Sensoren) variabel gestaltet werden kann. Der konstruktive Aufbau des Versuchstandes ist in Abbildung 3 dargestellt.

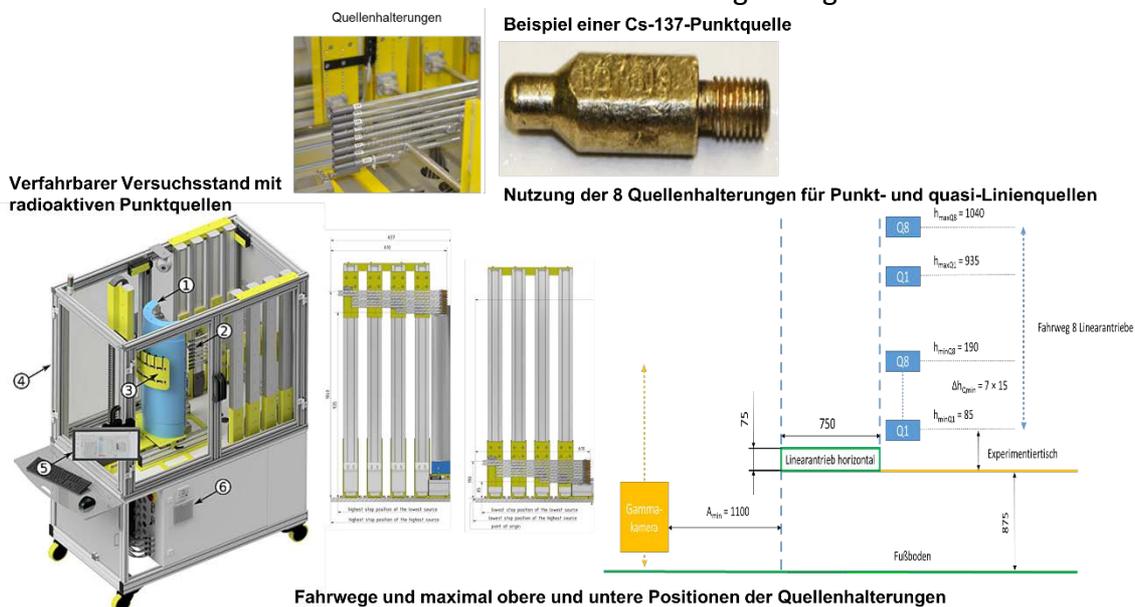


Abbildung 3 Aufbau des Versuchstandes für Labormessungen mit der Gamma-Kamera

Zu AP 1.3

Verschiedene Hersteller von 3D-Laserscantechnik wurden recherchiert. Eine abschließende Auswahl wurde wegen der Abwägungen zu technischen Leistungsfähigkeiten und wirtschaftlichen Anwendungsbetrachtungen noch nicht getroffen. Alternativ könnte die Gamma-Kamera auch mit einem UHF-RFID-Lesegerät ausgestattet werden. Diese Technik kann ermöglichen, die genaue Position des Gerätes im Raum zentimetergenau festzustellen. Das Prinzip beinhaltet, dass durch Sensoren im Gerät in Verbindung mit Ortsmarken (Sendern) und einer automatischen Protokollierung, die Kartierung von Kontaminationen einfacher festgestellt werden können. Allerdings ist in geschlossenen Räumen wegen der Reflexion und Streuung von

Funkwellen die Verwendung dieser Technologie nicht ganz einfach. Die Anbringung von Ortsmarken bedingt ggf. zusätzliche radiologische Belastungen.

Zu AP 1.5

Zur Vorbereitung des AP 4.2 wurden Versuchsmatrizen aufgestellt, die insbesondere Messungen mit vorhandenen Punktquellen im Strahlenlabor beinhalten. Die Versuchsmatrizen enthalten den einfachsten Fall der Positionierung einer einzelnen Punktquelle im Raum bis zur Anordnung von quasi Linienquellen, welche aus einzelnen nuklidspezifischen Strahlern bis zur Anwendung von gemischten Strahlenquellen bestehen. Als Absorberwände sollen in AP 4.3 Stahl und Kunststoff verwendet werden, die als typische Anwendungsfälle charakterisiert wurden.

Zu AP 2.3 (Zusammenarbeit mit VKTA)

Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen sind Nuklide mit relevanten Halbwertszeiten oberhalb von ca. 200 d relevant. Diese lassen sich in folgende Gruppen einordnen:

- Spaltstoffe: U-234, U-235, U-238, Pu-Isotope, untergeordnet Am-241
- Aktivierungsprodukte:
  - In Beton, Bauschutt: H-3, Na-22, Cs-134, Eu-152, Eu-154, bei Schwerbeton (Barytbeton) zusätzlich Ba-131 und vor allem Ba-133
  - In Stahl/Edelstahl: Mn-54, Fe-55, Co-57, Co-60, Ni-63, Zn-65
  - In Kabel: wie z.B. Cl-36 und/oder verschiedene Al- oder Cu-Isotope
  - In Abschirmungen: Blei-, Antimon-Isotope
  - Kollimatoren: Wolfram-Isotope, ggf. Cu-Isotope
- Spaltprodukte: Sr-90+, Cs-134 und Cs-137+

Aktivierete Gebäudestrukturen sind oft durch Mischungen an Nukliden gekennzeichnet. Gebäudekontaminationen sind insbesondere bei älteren Anlagen zu erwarten, in denen es z.B. zu Flüssigkeits-Leckagen aus dem Kühlmittelreinigungssystem gekommen war. Anlagenteile können auch oft mit Spaltprodukten kontaminiert sein. Nach der Durchführung von Versuchen in älteren Anlagen, können weitere Nuklide vorkommen. Das Vorkommen von Spaltstoffen ist auf wenige Bereiche innerhalb der kerntechnischen Anlagen beschränkt und meist anhand des Betriebsgeschehens eingrenzbar. Davon ausgenommen sind die wenigen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs, wo Spaltstoffe dominieren können.

Bei nuklearmedizinischen Anwendungen kommen Radionuklide zum Einsatz, die kurzlebig sind. Sie sind im Sinne der Notfallvorsorge relevant, bspw. bei der radiologischen Aufklärung im Zusammenhang mit einem Transportunfall. Hier sind aufgrund ihrer Verwendungshäufigkeit vor allem folgende Radionuklide zu betrachten: F-18, Ge-68+, Mo-99+, I-123, I-131, Lu-177, Lu-177m. Anlagenkontaminationen aus nuklearmedizinischen Anwendungen sind von untergeordneter Bedeutung.

Umgänge mit natürlichen radioaktiven Stoffen können ebenfalls Kontaminationen verursachen. Sie sind im Großen und Ganzen durch Ra-226+, Th-232+ und U-238+ hinreichend beschrieben.

Die Notfallvorsorge in Bezug auf Verkehrsüberwachung oder das Erkennen krimineller Handlungen bezieht sich im Wesentlichen auf Nuklide des o. g. Spektrums.

Es zeigt sich, dass sich die möglichen Einsatzfälle der Compton-Kamera nicht auf wenige Radionuklide einengen lassen. Zunächst sind einzelne Vertreter zu betrachten, die jeweils möglichst nur eine Energielinie besitzen, um die Reaktion der Compton-Kamera bei der jeweiligen Energie zu ermitteln. Nachgelagert sind Mehrlinienstrahler sowie Nuklidgemische zu verwenden. Die Gammalinien der o. g. Radionuklide, liegen im Energiebereich von ca. 50 bis 1500 keV. Für Testmessungen sind Radionuklide zu verwenden, deren Gammaenergien in diesem Bereich liegen.

## Zu AP 2.4

Es wurden Simulationen unter Verwendung der Software FLUKA für die acht vom Projektpartner Hellma vorgeschlagenen Detektorgruppen („DG1“ bis „DG8“) durchgeführt. Die Detektorgruppen unterscheiden sich durch die Anzahl und Anordnung von CeBr<sub>3</sub>- und EJ200-Szintillationsdetektoren. Mit Hilfe der FLUKA-Simulationen soll zunächst ermittelt werden, ob es eine bevorzugte Detektorgruppe gibt, um eine willkürlich im Raum vorhandene Kontamination zu detektieren bzw. zu lokalisieren.

In der ersten Simulationskampagne wurde die Kontamination als einzelne Punktquelle angenommen. Die Art der Kontamination wurde in Form der Radionuklide Am-241, Cs-137 und Co-60 sowie einer Positionierung an sieben verschiedenen Punkten auf einer Betonmauer variiert, die Positionen sind in Abb. 2 dargestellt. Jede Simulation beinhaltet also eine Detektorgruppe, ein Radionuklid-Punktquelle und eine Position der Punktquelle, damit ergeben sich für die Simulationskampagne in Summe 168 Simulationsrechnungen.

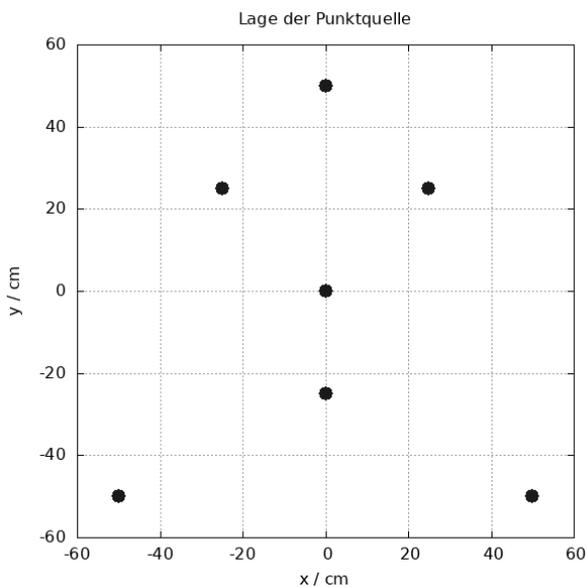


Abbildung 2: Lage der Punktquellen im Abstand von 100cm von der Detektorgruppe. In jeder Simulation wurde eine der dargestellten Punktquellen verwendet.

Die Monte Carlo-Simulationen mit FLUKA wurden für jedes Radionuklid mit einer Aktivität von 10.000 Bq und einer Anzahl von 10 Mio. histories durchgeführt.

## Zu AP 2.5

Für die Auswertungen der Simulationsrechnungen wird derzeit eine Auswerteroutine erarbeitet, die aufgrund der großen Anzahl an vorhandenen und zukünftig zu erwartenden Simulationsrechnungen einen möglichst hohen Grad der Automatisierung aufweisen soll.

Im Folgenden werden ausgewählte Resultate einer Simulation für die Detektorgruppe 3 (DG3) dargestellt. Diese planare Detektorgeometrie besteht aus jeweils drei CeBr<sub>3</sub>- und drei EJ200-Detektoren. Die Detektormittelpunkte sind auf einem gleichseitigen Dreieck mit der Kantenlänge 25cm angeordnet, siehe Abb. 3 (links). Die räumliche Zuordnung der Detektoren und der in der ersten Simulationskampagne möglichen Punktquellen ist in Blickrichtung der z-Achse in Abb. 3 (rechts) dargestellt. Für die Simulation wird ein Abstand von Punktquelle und Detektorebene in z-Richtung von 100 cm vorgegeben.

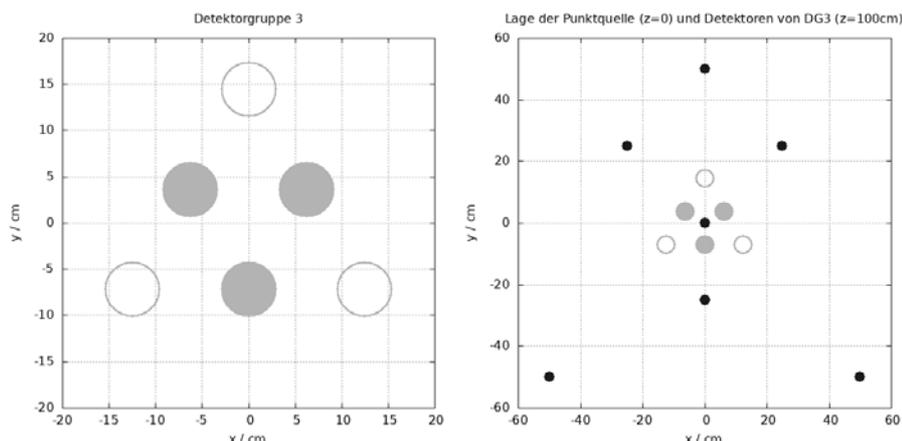


Abbildung 3: Detektoranordnung für Detektorgeometrie 3 (links) und Lage der in den Simulationsrechnungen jeweils verwendeten Punktquellen ( $z=0$ ) und Detektoren ( $z=100\text{cm}$ ).  $\text{CeBr}_3$ -Detektoren sind grau dargestellt, EJ200-Detektoren weiß.

Laut der Definition von Hellma ergeben sich für Detektorgruppe 3 somit neun unidirektionale ( $\text{EJ200} \rightarrow \text{CeBr}_3$ ) und drei bidirektionale Detektorpaare ( $\text{CeBr}_3 \leftrightarrow \text{CeBr}_3$ ). In der Auswertung werden mit Hilfe der in *Deliverable D3* (interne Zuarbeit von Hellma) aufgeführten Gleichungen die Comptonwinkel für uni-direktionale Detektorpaare bzw. die Pseudo-Comptonwinkel für bidirektionale Detektorpaare berechnet und als Verteilungsdiagramm im Bereich zwischen  $0$  und  $180^\circ$  dargestellt.

Exemplarisch ist diese Auswertung für die unidirektionalen Detektorpaare der DG3 mit einer Am-241 Punktquelle in zwei Position ( $[0\text{cm}, 0\text{cm}]$  bzw.  $[-50\text{cm}, -50\text{cm}]$ ) in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Im Falle der Quellenposition im Zentrum der Detektoranordnung ergibt sich eine annähernd symmetrische Verteilung der Compton-Winkel mit einem Maximum im Bereich von  $90^\circ$  (siehe Abb. 4, rechts). Wird die Quelle deutlich aus der Mittelpunktslage verschoben, in diesem Fall nach links unten, so wird die Verteilung der Comptonwinkel asymmetrisch und verschiebt sich zu kleineren Winkeln. Das Maximum ist nun im Bereich  $70^\circ$ , wie in Abb. 5 zu sehen ist. Naturgemäß wird die Anzahl der Detektorereignisse – und damit auch der Streuereignisse – geringer, wenn die Quelle aus der Mittelpunktslage verschoben wird.

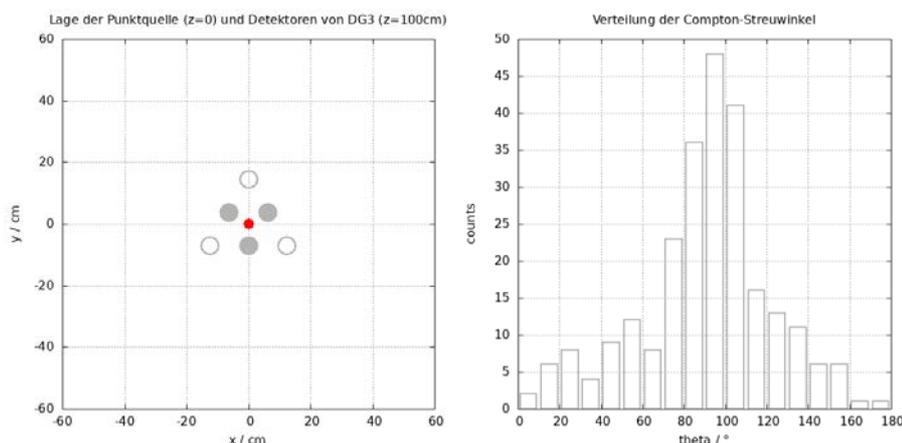


Abbildung 4: Mittelpunktslage der Punktquelle bei  $z=0$  und Detektoren bei  $z=100\text{cm}$  (links) und berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts).

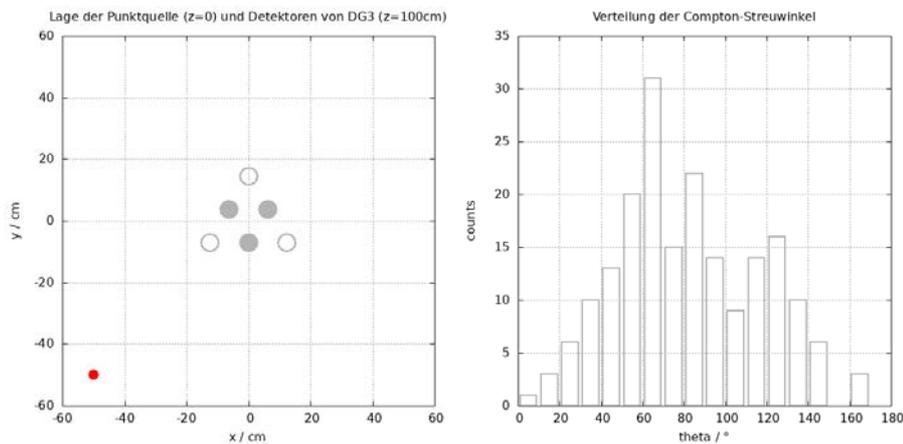


Abbildung 5: Lage der Punktquelle weit außerhalb der Mittelpunktslage bei  $z=0$  und Detektoren bei  $z=100\text{cm}$  (links) und berechnete Verteilung der Compton-Winkel der unidirektionalen Detektorpaare (rechts).

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

##### Zu AP 2.3

Die Festlegung der Nuklidvektoren ist in Abstimmung mit den Projektpartnern (insb. HELLMA und VKTA) fortzuführen. Erfordernisse für die Beschaffung zusätzlicher radioaktiver Quellen sind zu spezifizieren und festzulegen.

##### Zu AP 2.4

Während in der ersten Simulationskampagne Punktquellen an verschiedenen einzelnen Positionen angenommen wurden, wird in den folgenden Simulationskampagnen die Art der Kontamination wie folgt erweitert:

- Simulationskampagne 2: schrittweise Verschiebung der Punktquelle auf einer definierten Bahn
- Simulationskampagne 3: Verwendung von Linienquellen für die Kontamination
- Simulationskampagne 4: Verwendung von Flächenquellen für die Kontamination

Nach Auswertung und Interpretation der 4 genannten Simulationskampagnen können weitere Konstellationen benannt und simuliert werden, die für die Bewertung der Detektorgruppen interessant sein könnten.

##### Zu AP 2.5

Die im Ergebnisteil dargestellte, exemplarische Auswertung wird auf alle 168 Kombinationen der Simulationskampagne 1, bestehend aus Variablen Detektorgruppe, Radionuklid und Lage der Punktquelle angewendet. Daraus werden Ableitungen über mögliche bevorzugte Detektorgruppen getroffen, die für die Detektion beliebig im Raum vorhandener Kontaminationen ein vielversprechendes Ansprechverhalten zeigen. Es schließen sich die Auswertungen der weiteren Simulationskampagnen an.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine bekannt

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 – 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, Teilprojekt: Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 237.501,88 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radio-nuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann. Der VKTA hat hier bereits tiefgründige Erfahrungen bei dem Rückbau des Rossendorfer Forschungsreaktor bis zur grünen Wiese sammeln können. Im Projekt ist der VKTA vorrangig für die Gegenüberstellung von konventionellen Messmethoden mit der zu entwickelnden Methode beteiligt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1 Planung und Entwurf

- 1.5 Entwicklung Anforderungs- und Messkonzept (6/2021-11/2021)
- 1.5 Planung AP 4 und AP 5 (8/2021-11/2021)

### AP 2 Simulation, Modellierung

- 2.5 Festlegung Nuklidvektoren (8/2021-3/2022)

### AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

- 5.2 Validierungsmessungen am VKTA (7/2023-2/2024)
- 5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (9/2023-2/2024)
- 5.4 Gegenüberstellung mit rückbauerproben Verfahren (9/2023-2/2024)

### AP 6 Workshop & Dokumentation

- 6.1 Wissenschaftliche Bewertung & Dokumentation (1/2024-5/2024)
- 6.2 Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (1/2024-5/2024)
- 6.3 Planung, Durchführung, Auswertung Workshop (12/2023-4/2024)
- 6.4 Abschlussbericht (3/2024-5/2024)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### AP 1.1 Entwicklung Anforderungs- und Messkonzept

In einem ersten Arbeitsschritt erfolgte die Definition wichtiger Anforderungen an die zu entwickelnde Compton-Kamera, ausgerichtet für den Einsatz bei Rückbauprojekten sowie zur Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr. In Tabelle 1 sind die Anforderung mit den zu prüfenden Anforderungen zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht über wichtige Anforderungen an die Compton-Kamera.

Anforderung	zu prüfenden Bedingung
- Nutzung der Ortsauflösung für die Lokalisierung erhöhter Aktivitäten	→ Diskriminierung von Störfelder → min/max. bestimmbare Aktivitäten → Messzeiten
- Bestimmung von Aktivitätsverteilungen zur Beurteilung möglicher Kontaminationspfade	→ Trennung der einzelnen Nuklide bei Vorliegen von Nuklidgemischen
- kompakte Bauweise/Messaufwand	→ einfache Positionierung → „kurze“ Messzeiten (Vergleich zu anderen Verfahren)
- Diversität	→ Messgeometrien und -szenarien (siehe unten)

Für die Detektorcharakterisierung durch die HSZG wurde eine erste Vorauswahl möglicher Nuklide zur Evaluierung getroffen. Hier gilt zu beachten, dass der komplette Energiebereich von 50 – 1500 keV abgedeckt wird. Im ersten Schritt ist geplant, monoenergetische Nuklide zu verwenden, da hier eine eindeutige Zuordnung des Messeffektes möglich ist. Als Nuklide wurden hier Cs-137+ sowie Co-60 ausgewählt. Co-60 besitzt zwei Linien, welche jedoch beide eine Emissionswahrscheinlichkeit von 100 % aufweisen. Weiterhin ist Co-60 ein sehr relevantes Nuklid in Kernkraftwerken. Wenn möglich soll zusätzlich auch Am-241 mit in die Betrachtungen aufgenommen werden.

Im zweiten Schritt sollen multienergetische Gammastrahler herangezogen werden. Hierfür eignen sich sehr gut Eu-152 sowie Ba-133.

#### AP 1.5 Planung AP 4 und AP 5

Im AP 1.5 erfolgte die Definition möglicher Messgeometrien für die spätere Evaluierung. Dabei wird eine aufsteigende Komplexität der Geometrien angestrebt.

Die Definition möglicher Geometrien für die Testreihen der Compton-Kamera unterteilen sich in vier Abschnitte:

- einfache Geometrien (bspw. Punkt- und Flächenquellen)
- komplexe Geometrien (bspw. Volumenquellen und Zylindermäntel)
- Sondergeometrien (bspw. massive Objekte, Bündel mehrerer Einzelquellen)
- Messung Gebinde (Kalibriergebinde, reale Gebinde)

Dabei werden einzeln und additiv jeweils Einflussfaktoren variiert. Dies können sein:

- Reaktion auf den Einfall von Störstrahlungsfeldern, insbesondere lateral
- Reaktion auf rückwärtig lokalisierte Strahler
- Einflüsse des Messabstandes
- Einflüsse von Abschirmungen.

Zur Durchführung der geplanten Versuche wurde eine Versuchsmatrix aufgestellt, welche an der HSZG sowie beim VKTA durchgeführt werden sollen. Die Auswahl der Versuche erfolgt in Absprache zwischen den beiden Institutionen.

Darauf aufbauend bzw. zeitlich ineinandergreifend soll die Definition realer Gebinde und Messszenarien, wie sie z.B. bei einem Rückbau einer kerntechnischen Anlage auftreten können, erfolgen. Das können sein:

- Überdeckung der Strahlenquelle durch Objekte
- dreidimensionale Strahlenquellen
- mehrere Strahlenquellen in verschiedenen Abständen und Aktivitäten.

Hierfür existieren bereits einige Testgebinde und -geometrien am VKTA, welche zum Einsatz kommen sollen (Abbildung 4). Weiterhin ist auch die Neuerstellung weitere Geometrien in der Planung. Des Weiteren wird geprüft, inwieweit reale Strukturen rückgebauter Anlagen des VKTA bzw. von Anlagen am FSR eingesetzt werden können.



Abbildung 4: Exemplarische Darstellung der verfügbares Fertiggebinde.

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

laufende Arbeiten zu AP 2.3 Festlegung Nuklidvektoren

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH (Framatome)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM), Teilprojekt: Entwicklung und Bau der Messanlage	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.09.2018 bis 28.02.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.056.096,25 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Laurent Coquard	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> laurent.coquard@framatome.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT aufgebaut und getestet. Später wird die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach ergänzt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen Framatome beteiligt ist, sind: AP1 (Anlageauslegung, Konstruktion und Detailengineering), AP5 (Softwareentwicklung für Betrieb und Messdatenauswertung), AP7 (Methode zur Identifizierung chemischer Verbindungen), AP9 (Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage), AP10 (Experimentelle Validierung mit verschiedenen Matrices), AP11 (Aufbau & Inbetriebnahme der mobilen Messanlage), AP13 (Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen).

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Es wurden im Rahmen des Arbeitspaketes AP10 (Experimentelle Validierung mit verschiedenen Matrizes) Abweichungen in der Massenrekonstruktion im Vergleich zu den Referenzergebnissen vom Forschungsreaktor Budapest beobachtet. Die Ursache dieser Abweichungen wurde experimentell seitens AiNT untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Fässer während der Messung auf dem PTFE Stopfen rutschen und kippen können. Eine Lösung wurde seitens der Konstruktionsabteilung von Framatome entwickelt. Es handelt sich um Anpassungen, die das Kippen des unteren PTFE Stopfens (und de facto des Fasses) zu verhindern bzw. stark zu reduzieren. Zudem wurde eine Lösung entwickelt um das Rutschen der Fässer zu verhindern und das Positionieren der Fässer auf dem Drehteller zu erleichtern: der PTFE Deckel (unter den Fässern) wurde nachbearbeitet. Es wurden Nuten mit verschiedenen Durchmessern in den Drehteller eingefräst. Das Testen dieser zwei mechanischen Änderungen wurde vor Ort erfolgreich durchgeführt und dokumentiert. Zudem wurden ebenso steuerungstechnische Änderungen, wie beispielweise die Softwareanpassungen im Automatik- und Handbetrieb vorgenommen, die zu einer besseren Funktionalität der Messanlage führen. Im Rahmen des Arbeitspaketes (AP11: Abbau, Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage in der Konditionierungseinrichtung) wurden verschiedene Szenarien ermittelt und die entsprechende technische Machbarkeit der Szenarien evaluiert. Ein mögliches Szenario wäre das Einbringen eines Sondercontainers in den Vorraum des Technikums, die Messanlage dann darin wiederaufzubauen um danach den Sondercontainer gesamt der Anlage hinauszubefördern. Dieses Szenario wurde schlussendlich jedoch als technisch nicht realisierbar eingestuft. Die aufgebaute Anlage auf dem Container wäre zu hoch und würde dann an die Stahlstruktur des Gebäudes stoßen. Zudem müsste das Haupttor des Technikums vergrößert werden, oder ein neues Haupttor auf der zum Parkplatz ausgerichteten Seite errichtet werden. Aus diesen Gründen wurde dieses Szenario nicht weiterverfolgt.

Die Randbedingungen des Transports eines Sondercontainers (Gewicht und Abmessungen) innerhalb des EWR wurde untersucht. Aus diesen Erkenntnissen entstehen zusätzliche Anforderungen für die Auslegung des Sondercontainers (AP1). Die bisherigen erzielten sehr guten Ergebnisse im Bereich der Validierung (AP10) zeigen, dass die Methodologie der Messanlage Quantum funktioniert, und dass die Messanlage mit nichtradioaktiven vollen Referenzfässern validiert ist.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

In Q1 2022 wird die Auswertung der radioaktiven Abfallfässer und der nichtradioaktiven heterogenen Referenzfässer fortgeführt. Es werden BUGS Fixierungen bzw. Verbesserungen im Bereich der Automatisierungstechnik durchgeführt. Es wird an eine Erweiterung des Datenbank-Systems (AP12) gearbeitet.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es gibt keinen Bezug bzw. keinen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Coquard et al.: **“Non-destructive material characterization of radioactive waste packages with QUANTOM®”**, Konferenz der IAEA: **“Radioactive Waste Management for a sustainable future”**, Wien, Nov. 2021.

Coquard et al.: **“Zerstörungsfreie stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM®”**, KONTEC, Dresden, 2021.

Coquard et al.: **“QUANTOM - Non-destructive material characterization of radioactive waste”**, ICOND, Aachen, 2021.

Coquard et al.: **“Non-destructive material characterization of radioactive waste packages with QUANTOM®”**, IAEA, Conference **“International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future”**, 2021.

Havenith et al.: **„Stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM“**, Fachverband für Strahlenschutz, Jahrestagung 2021, Aachen, 2021.

### Online Veröffentlichung:

<https://www.framatome.com/solutions-portfolio/portfolio/product?product=A1688>

L. Coquard, A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, ICOND, Digital, 24-26.11.2020.

L. Coquard, A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WMS 2020 Conference, Phoenix, Arizona, USA, March 8-12, 2020.

**Internationale Pressemitteilung von Framatome:**  
<http://www.framatome.com/EN/businessnews-1456/framatome-entwickelt-mobile-technologie-zur-zerstrungsfreien-analyse-von-radioaktiven-abfllen.html>, 18.12.2018.

L. Coquard, A. Havenith, et al.: **„Stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM“**, KONTEC 2019, Dresden, 27. - 29. März 2019.

A. Havenith, L. Coquard et al.: **Projektsteckbrief zum BMBF-Förderprojekt**, <http://www.framatome.com/businessnews/liblocal/docs/Presse/QUANTOM-GER-201811.pdf>, 22.11.2018.

A. Havenith, L. Coquard et al.: **“QUANTOM - Non-destructive scanning of waste packages for material description and plausibility check”**, AMNT 2019, Berlin, 07. - 08. Mai 2019.

A. Havenith et al.: **QUANTOM®-Non-destructive scanning of radioactive waste packages for material characterization**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

O. Schumann et al.: **QUANTOM® - Optimization of the online neutron flux measurement system**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM), Teilprojekt: Methoden- und Softwareentwicklung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.09.2018 bis 28.02.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 851.741 Euro
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Andreas Havenith	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> havenith@nuclear-training.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT errichtet und getestet. Nachfolgend wird die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert und in einer Konditionierungsstätte betrieben. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach erstellt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit, Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren, wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen AiNT beteiligt ist, sind:

- AP1 Anlagenauslegung, Konstruktion und Detailengineering
- AP2 Strahlenschutzkonzept inkl. Abschirm- und Aktivierungsberechnungen
- AP3 Nuklearphysikalische Simulation inkl. Validierung
- AP4 Genehmigungsverfahren für den Betrieb der Messanlage
- AP5 Softwareentwicklung für Betrieb und Messdatenauswertung
- AP6 Mathematische Methodenentwicklung
- AP7 Software zur Verifizierung und Erstellung der stofflichen Beschreibung
- AP8 Neutronenspektrometrie und Neutronenflussmessung
- AP9 Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage

- AP10 Experimentelle Validierung mit verschiedenen Matrizes
- AP11 Abbau, Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage in einer Konditionierungseinrichtung
- AP12 Online-Neutronenflussmessung innerhalb der Messkammer
- AP13 Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen
- AP14 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse
- A15 Datenbanksystem

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Auf Grundlage der nuklearphysikalischen Simulationen der Messanlage mit MCNP wurde das Detailengineering für die stationäre Messanlage QUANTOM® (AP1) abgeschlossen. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Messanlage im Technikum von AiNT (AP9) wurde inkl. der Integration des Krans im 2. HJ 2020 abgeschlossen. Am 26.10.2020 hat der Sachverständige im Auftrag der atomrechtlichen Aufsichts- und Genehmigungsbehörde die Messanlage bzgl. dem baulichen und operativen Strahlenschutz geprüft und erfolgreich abgenommen. Da die Genehmigung für die Inbetriebnahme der stationären Messanlage gemäß § 12 StrlSchG (AP4) seit Juni 2019 vorliegt, konnte nach der erfolgreichen Sachverständigenprüfung sofort der Testbetrieb beginnen. Arbeitspaket AP4 ist somit bis auf die regelmäßige Korrespondenz mit der Behörde und die Überwachung der Genehmigungsaufgaben abgeschlossen. Mit der betriebsbereiten Messanlage wurden im ersten HJ 2021 die experimentellen Messdaten (PGNAA-Spektren) für die nichtradioaktiven Referenzmaterialien sowie eine erste Charge von radioaktiven Abfallfässern erhoben. Der Fokus im Berichtszeitraum lag darin, diese Messdaten auszuwerten und somit das gesamte Messverfahren stufenweise zu validieren. Beim Auswerteverfahren wurden zunächst die hochauflösenden Gammaskpektren händisch ausgewertet, um die Prompt-Gamma-Peaks zu identifizieren und das Nettomesssignal zu quantifizieren. Für die Quantifizierung der Elementmassen auf Basis des Nettomesssignals wurden alle Parameter der Messungen berechnet. Diese Parameter ergeben sich aus der Berechnung der elementabhängigen partiellen Wirkungsquerschnitte und der Gamma- sowie Neutronentransportmodellierung. Zur Bestimmung des orts- und energieabhängigen Neutronenflusses wurden die Fässer und deren Inhalt im Berichtszeitraum sowohl mit MCNP als auch mit SPARC modelliert. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden verglichen und zeigen eine gute Übereinstimmung. Vergleiche der rekonstruierten Elementmassen zeigen, dass die Richtigkeit sich durch die Verwendung von SPARC nur geringfügig verschlechtert, jedoch der Zeitvorteil für die iterativen Simulationsstudien diesen Nachteil wett macht. Des Weiteren wurde im zweiten HJ 2021 der Neutronentransport Code SPARC in die Gesamtsoftware zur Steuerung und Auswertung der Messungen (PEAK) integriert. Hierzu mussten auf beiden Seiten Softwareschnittstellen programmiert und getestet werden. Die im Projekt entwickelte Neutronentransportmodellierung (SPARC) basiert auf einer SPN-Diffusionsapproximation und einem Finite-Elemente-Programm zur Lösung der partiellen Differentialgleichungen. Die Berechnungen der Photopeak-Effizienzen der aus dem Fass emittierten Gammastrahlung bis zur vollständigen Energiedeposition im HPGe-Detektor erfolgte mit dem Code TRACER, welcher ebenfalls im Berichtszeitraum final in die Auswertesoftware PEAK integriert wurde (AP5). TRACER wurde weiterentwickelt, sodass auch die Photopeak-Effizienzen von einzelnen Radialsektoren im Fass berechnet werden können. Es wurde ein Code für die Massenrekonstruktion programmiert, welcher im Ergebnis die orts aufgelöste Massenverteilung der einzelnen Elemente im Fass berechnet und visualisiert. Eingangsgrößen dieses Codes sind die oben beschriebenen Messparameter. Durch die Verkettung sämtlicher Softwareprogramme konnten die seitens AiNT entwickelten Transportcodes (TRACER, SPARC) im Gesamtauswerteverfahren validiert werden.

Die Ergebnisse der Auswertungen der nichtradioaktiven Referenzmaterialien wurden mit den Referenzanalysen vom Department of Nuclear Analysis and Radiography, Centre for Energy Research am Forschungsreaktor in Budapest sowie mit denen der AiNT-Messanlage [ZEBRA](#) verglichen. Die Auswertung der radioaktiven Abfallfässern wird fortgesetzt und im ersten HJ 2022 abgeschlossen werden.

Ein Schwerpunkt der Software- und Methodenentwicklung im Berichtszeitraum (AP5 & AP6) lag bei der automatischen Peakauswertung und deren Integration in der Auswertesoftware PEAK. Die automatische Peakauswertung beinhaltet die Aufgaben des automatischen Fittens, Entfaltens und Identifizierens von Prompt-Gamma-Peaks im Spektrum. Diese Aufgabe ist überaus anspruchsvoll, weil in den experimentell erhobenen Spektren bis zu 700 Peaks enthalten sind. Der Code der probabilistischen Unsicherheitsanalyse wurde im Berichtszeitraum in die PEAK-Software integriert und getestet (AP14). Die probabilistische Berechnung der Gesamtunsicherheit einer Messung wurde erfolgreich getestet, wobei sämtliche bekannte Unsicherheitsbeiträge hinreichend genau abgebildet werden konnten. Die Programmierung des Codes zur Berechnung von Erkennungs- und Nachweisgrenzen (Sensitivitätsanalyse) ist noch nicht abgeschlossen. Im November und Dezember 2021 wurden für die zweite Phase der Validierung des Messverfahrens die Messungen mit heterogen verteilten Referenzmaterialien durchgeführt. Hierzu wurden mittels der bekannten Referenzmaterialien und einem Spezialfass verschiedene heterogene Elementverteilungsmuster hergestellt und die Messdaten akquiriert. Mit den Arbeiten, die sich aus den Anforderungen der mobilen Messanlage ergeben, wurde im Berichtszeitraum noch nicht begonnen.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

Die im Folgenden beschriebenen geplanten Arbeiten stehen unter Vorbehalt der Freigabe der Zuwendungsmittel für das Jahr 2022. In Q1 2022 wird die Auswertung der radioaktiven Abfallfässer und der nichtradioaktiven heterogenen Referenzmaterialien fortgeführt. Bei erfolgreichem Abschluss sind die Validierungsphasen des Messverfahrens abgeschlossen. Es wird an dem Code Berechnung von Erkennungs- und Nachweisgrenzen gemäß DIN ISO 11929 (Sensitivitätsanalyse) gearbeitet. Innerhalb von AP5 wird an der iterativen Kopplung der einzelnen Softwaremodule und deren Erprobung an experimentellen Messdaten gearbeitet. Insbesondere wird getestet, was passiert, wenn mit stark abweichenden initialen Elementzusammensetzungen bei dem Auswerteverfahren begonnen wird. Im laufenden Testbetrieb wird die Steuerungssoftware weiter getestet und bedarfsgerecht weiterentwickelt. Fokus liegt hier insbesondere auf der Robustheit und der Qualitätssicherung der Automatisierung der Peak-Auswertung.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es gibt keinen Bezug bzw. keinen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Dr. Laurent Coquard, Dr. Andreas Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WM2022 Conference, March 6 – 10, 2022, Phoenix, Arizona, USA

Es werden hier nur die aktuellsten Veröffentlichungen aufgeführt. Für die weiteren Veröffentlichungen wird auf die vorhergehenden Halbjahresberichte verwiesen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-INT für die Fraunhofer-Gesellschaft	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) Teilprojekt: Online-Messungen des Neutronenflusses	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 28.02.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 225.278,94 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Theo Köble	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> theo.koeble@int.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT aufgebaut und getestet. Später wird die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach ergänzt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen FINT beteiligt ist, sind:

- AP1 Anlagenauslegung, Konstruktion und Detailengineering
- AP8 Neutronenspektrometrie und Neutronenflussmessung
- AP11 Abbau, Aufbau & Inbetriebnahme der Messanlage in der Konditionierungseinrichtung
- AP12 Online-Neutronenflussmessung innerhalb der Messkammer
- AP13 Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Berichtszeitraum wurde seitens FINT in AP12 gearbeitet. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Zählraten der Neutronenzählrohre, im mobilen, bzw. im stationären Teil der Anlage sich gegenseitig beeinflussen, da für jeden der beiden Anlagenteile die Daten von jeweils 16 Zählrohren in einer Elektronik zusammengeführt werden. Somit musste die Totzeitkorrektur weiter verbessert werden. Hierzu wurden mehrere Vorschläge erarbeitet, die mittlerweile im Konsortium abgestimmt wurden. Des Weiteren zeigten sich geringe zeitliche Driften bei den Verstärkereinstellungen der Neutronenzählrohre. Hier fanden erste Überlegungen statt, wie eine möglichst fehlertolerante Rekalibrierung im Einsatz erfolgen könnte. Die Driften wurden weiter beobachtet und der Einfluss auf das Ergebnis quantifiziert.

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die im Folgenden beschriebenen geplanten Arbeiten stehen unter Vorbehalt der Freigabe der Zuwendungsmittel für das Jahr 2022.

In AP12 wird daran gearbeitet die Implementierung der direkten Messung der Totzeit der beiden Elektronikmodule zu realisieren, da dies in Zukunft für eine erweiterte Totzeitkorrektur vorgesehen ist. Dies wird auch dann eine verlässliche Korrektur liefern, wenn die Quellstärke des Generators deutlich schwankt. Des Weiteren wird die Beschaffung einer geeigneten Spaltkammer nebst zugehöriger Auswerteelektronik erfolgen.

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es gibt keinen Bezug bzw. einen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Dr. Laurent Coquard, Dr. Andreas Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WM2022 Conference, March 6 – 10, 2022, Phoenix, Arizona, USA
- Dr. Laurent Coquard, Dr. Andreas Havenith, et al.: **Zerstörungsfreie stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM®**, KONTEC 2021, Dresden, 25. - 27. August 2021.

Es werden hier nur die aktuellsten Veröffentlichungen aufgeführt. Für die weiteren Veröffentlichungen wird auf die vorhergehenden Halbjahresberichte verwiesen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9411
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbesserung der quantitativen Datenauswertung für die zerstörungsfreie Charakterisierung radioaktiver Behälter und Objekte (Quant)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.05.2019 bis 30.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 943.315,14 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Christoph Lierse von Gostomski	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Christoph.lierse@tum.de

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens soll eine effektive Verknüpfung von Daten aus dem segmentierten Gamma-Scanning, Transmissionsmessungen mit Gamma-Strahlern und a-Priori-Informationen unter Verwendung bayes'scher Verfahren erarbeitet werden.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die geplanten Arbeitsschritte sind:

- AP 1. Informationsgewinnung
- AP 2. Entwicklung eines Voxel-Modells
- AP 3. Modellentwicklung - Auswertung Gamma-spektrometrischer Messungen und Nuklididentifikation
- AP 4. Ableitung der Matrixzusammensetzung
- AP 5. Simulation der Messdaten
- AP 6. Iterative Optimierung
- AP 7. Korrelation von Messdaten und sonstigen Informationen
- AP 8. Realisation eines einfach zu bedienenden Auswerteprogramms
- AP 9. Verifikation durch Messungen mit Kalibrationsobjekten bekannter Matrixzusammensetzung und bekannter Aktivitätsverteilung
- AP 10. Diskussion der Ergebnisse und Abschluss des Projekts mit einem ausführlichen Bericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Die eingesetzten grundlegenden physikalischen und mathematischen Aspekte des Vorhabens sowie erste erzielte Ergebnisse wurden im Berichtszeitraum publiziert ([1], open access). Der intensive Review Prozesses führte zu verschiedenen neuen Fragestellungen, die vertieft untersucht wurde. Ein Punkt betraf die Frage nach der Konvergenz der eingesetzten Analyseroutinen, der wesentlich für die Beurteilung der Aussagekraft der Ergebnisse ist, und im Berichtszeitraum vertieft untersucht wurde. Die Qualität eines Analyseergebnisses, d. h. eine Posterior-Verteilung der untersuchten Größen (z. B. Aktivitätswert, Position eines Objekts etc.) basierend auf der verwendeten Monte Carlo Markov Chain (MCMC) Methode, wird üblicherweise durch den Wert des „R-hat“ Kriteriums beschrieben. Dieses vergleicht Schätzwerte der Modellparameter zwischen und innerhalb der Ketten (Markov Chains) sowie weitere univariate Größen und resultiert in einer einzelnen Zahl, die optimalerweise den Wert 1 haben sollte.

Ergänzend zu dem „R-hat“ Kriterium wurden im Berichtszeitraum weitere Kriterien implementiert und analysiert. Als zentral hat sich hierbei der Vergleich zwischen den Observablen (z. B. Anzahl der von einem Detektor registrierten Photonen) und den vorhergesagten Observablen, die aus der berechneten Posterior-Verteilung und der verwendeten Modellfunktion (Likelihood-Funktion) bestimmt werden, herausgestellt. Hierbei wird die Anzahl der registrierten Photonen als Zufallszahl einer Poisson-Verteilung betrachtet, während die vorhergesagte Anzahl als Zufallszahl mit dem Erwartungswert entsprechend dem individuellen Parametersatz eines jeden Samples der Trace betrachtet wird. Aus einem Vergleich der beiden Verteilungen können systematische Abweichungen zwischen den gemessenen und den vorhergesagten Daten und damit unzureichende Modellbeschreibungen oder zu kurze Marcov Chains erkannt werden. (AP 3)

Alle bisherigen Untersuchungen gingen von einer bekannten Matrixzusammensetzung aus, die in der Praxis im Allgemeinen nicht gegeben ist. Dies resultiert in unberücksichtigten Unsicherheiten in den erzielten Ergebnissen, die sich auch in den Ergebnissen der Konvergenzkriterien widerspiegeln können. In einem ersten Schritt wurden diese Unsicherheiten in der Gewichtsmatrix des Modells berücksichtigt. Während das Modell generell das gesuchte Ereignis (z. B. Aktivitätswert) mit dem gemessenen Ereignis (z. B. Zählrate) verknüpft, beschreibt die Gewichtsmatrix die Stärke des jeweiligen ortsabhängigen Beitrags der Verknüpfung. Die im Analyseverfahren eingesetzte Gewichtsmatrix mit bislang festem Wert für jeden Matrixpunkt wird durch eine Verteilungsmatrix ersetzt, d. h. jeder Matrixpunkt entspricht einer Gleichverteilung zwischen zwei Grenzwerten (Rechteckverteilung). Die Grenzwerte werden aus zwei vorab berechneten Gewichtsmatrizen bestimmt, die für unterstellte minimale bzw. maximale Absorptionskoeffizienten der Matrix berechnet werden. (AP 3/AP 6)

Transmissionsmessungen liefern zusätzliche Informationen zur Beschreibung der Matrixzusammensetzung und können zur Reduzierung der auch bei unterstellten maximalen und minimalen Werten der Gewichtsmatrix vorhandenen Unsicherheit wesentlich beitragen. Im Berichtszeitraum wurde mit der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung und Analyse von Transmissionsmessungen begonnen, um eine Optimierung zwischen Informationsgewinn bzgl. der Matrixzusammensetzung und der Komplexität des eingesetzten Messmodus zu erreichen (d. h. letztere soll minimiert werden bei gleichzeitig ausreichender Matrixinformation für die Analyse der Emissionsmessungen). Im weiteren Verlauf des Vorhabens soll dieses Modell mit dem Modell der Emissionsmessung verknüpft werden um eine integrale und einheitliche Analyse aller verfügbarer Messdaten zu erzielen. (AP 4/AP 7).

Für die Weiterentwicklung des Auswerteverfahrens für die Emissionsmessungen wurden systematisch Untersuchungen mit synthetischen Observablen, also Messdaten die durch die Modellierung selbst vorhergesagt wurden, durchgeführt. Dies erlaubt den direkten Vergleich zwischen bekannter Aktivität und rekonstruierter Aktivität ohne experimentelle Unsicherheiten aufgrund von Imperfektionen in der Modellierung. Hier wurden der Einfluss des Monte-Carlo Samplers (Hamiltonian NUTS vs. Metropolis-Hastings), Anzahl an Samples und Burn-in systematisch untersucht. (AP 3/AP 5)

Eine weitere Verbesserung des Verfahrens konnte hinsichtlich der Anwendung des Voxelmodells erzielt werden. Bislang wurde von diskreten Positionen in den jeweiligen Voxelzentren ausgegangen. Gerade bei Gebinden hoher Dichte kann dies zu deutlichen systematischen Abweichungen führen, da aufgrund dieser Diskretisierung benachbarte Positionen erhebliche Unterschiede in der Gewichtsmatrix bei stark unterschiedlichen Absorptionswerten aufweisen können. Diesem Problem wurde Rechnung getragen durch eine Modellierung der Position als

kontinuierliche Variable und trilinearer Interpolation des Gewichts aus den benachbarten Voxeln. Das Voxelmodell selbst ist unverändert geblieben. Die beobachteten bimodalen Verteilungen in Aktivitätsverteilungen für Quellen auf Zwischenpositionen werden hierdurch vermieden. (AP 2/AP 3/ AP 6)

Durch eine weitere Anpassung des Modells, das als Observable nicht mehr die Nettophotonanzahl sondern nunmehr die Anzahl von Photonen im Bereich der Emission (Bruttoanzahl) und in den Seitenbändern als Eingabegröße berücksichtigt, wurde eine deutlich verbesserte Konvergenz beobachtet. Die Nettophotonenanzahl wird simultan im Bayes-Verfahren bestimmt (AP 3/AP 6).

Parallel zu den beschriebenen Arbeiten wurde die GUI zur Nutzung des Analyseverfahrens weiterentwickelt. So wurden die Auswahl der Messdaten, die Wahl der Gewichtsmatrizen sowie die Parametrisierung des Monte-Carlo-Samplers des Auswertalgorithmus sowie die interaktive Betrachtung der Ergebnisse zugänglich gemacht (AP 8).

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

Zur weiteren Evaluierung und Verifikation der Modellierung wurde ein flexibles Setup zur Präparierung verschiedener Quellgeometrien aus einzelne kleinen Volumenquellen vorbereitet mit dem die messtechnische Verifikation auf weitere Quellengeometrien ausgeweitet werden soll (AP3).

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Im Rahmen einer Werkstudententätigkeit wurde die Implementierung eines von SCK/CEN, Belgien, publizierten alternativen, ebenfalls auf dem Bayes-Verfahren basierenden, Algorithmus initiiert und erfolgreich auf simulierte Daten angewandt.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

[1] T. Bücherl, S. Rummel, O. Kalthoff; A Bayesian Method for the Evaluation of Segmented Gamma Scanning Measurements – Description of the principle, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (2021), DOI 10.1016/j.nima.2021.165887.

[2] S. Rummel, T. Bücherl, Ch. Lierse v. Gostomski, Verbesserung der Auswertung zerstörungsfreier Messungen radioaktiver Abfallgebinde mittels Bayes-Statistik, Kontec 2021 (15.08-18.08), Dresden

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9420
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Managen im Baubetrieb (TMB)	
<b>Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebände	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2020 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.588.164,16 € (inkl. Projektpauschale)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiter/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Forschungsprojekts EMOS ist eine mobile Inspektionseinheit, die fernhandelt und automatisiert die gesamte Fassoberfläche, einschließlich Deckel und Boden, optisch erfasst, analytisch auswertet und sowohl elektronisch speichert als auch die Ergebnisse in Form eines Inspektionsberichts ausgibt. Auf diese Weise können wiederkehrende Überprüfungen des Fassbestands unter immer gleichen Prüfbedingungen absolviert werden. Ein entscheidender Vorteil ist die Möglichkeit einer fernhandelten Durchführung der Inspektion, um die Strahlendosis der Mitarbeiter vor Ort zu reduzieren. Die optische Auswertung, Darstellung und Ausgabe der Ergebnisse wird durch eine speziell zu entwickelnde Software eine exaktere Überprüfung und Analyse der Fassoberflächen gewährleisten, als dies durch manuelle und visuelle Inspektionen möglich ist, wie sie aktuell in den Zwischenlagern ausgeführt werden. Das kontinuierliche Monitoring der lagernden Fassgebände wird erleichtert und auch die Rückverfolgung einer möglichen Schadensentwicklung durch den Abgleich von archivierten Messergebnissen ist ein neuartiges und starkes Instrument, das dazu beiträgt, die Sicherheitsaspekte der Zwischenlagerung zu erhöhen und langfristig zu gewährleisten. Korrosionsschäden können mit Hilfe der Inspektionseinheit bereits in einem sehr frühen Stadium identifiziert werden und es können frühzeitig Maßnahmen getroffen werden, die dem Verlust der Integrität der Lagerbehälter entgegenwirken.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1 (Grundlagenerarbeitung):** Recherchearbeiten, Ideenentwicklung, Erstellung und Abstimmung eines Anforderungsprofils, Zusammenstellung der möglichen Komponenten

**AP2 (Vorstudie):** Vorversuche zur Auslegung und Komponenten der Anlage, Vorversuche zur Konfiguration der Kamera- und Laserkomponenten und der optischen Aufnahme,

**AP3 (Konzeptphase):** Abgleich und Anpassung des Entwurfs mit KTA-Regelwerk und DIN-Normen für die Produktanwendung im kerntechnischen Bereich, Ausarbeitung eines abschließenden Entwurfs des kompletten Systems, Konzepterstellung, eine Auswertung der Versuche zur Detektion von Korrosion und Reaktion im Inneren des Fassgebändes.

**AP4 (Software-Entwicklung):** Überführung der Aufnahmen in lokales Koordinatensystem, automatische Erkennung von Schadstellen aus Bildern, automatische Analyse des 3D-Profiles der Oberfläche

**AP5 (Erstellung Demonstrator 1.0):** Bau des Systems (Demonstrator 1.0), Einbau des optischen Aufnahmesystems in den fertiggestellten Demonstrator 1.0 (M2)

**AP6 (Feineinstellungs- und Testphase):** Testphase und Kalibrierung des gesamten Aufnahmesystems, Anpassung von Änderungen aus der Testphase auf das ausgearbeitete Konzept aus Arbeitspakets 3

**AP7 (Validierungsphase):** Anpassung, Validierung und Verbesserung der Hard- und Software, Testaufnahmen mit kalibriertem, optischem System, Test der automatischen Prozessierung

**AP8 (Iterationsphase und Bau Demonstrator 2.0):** Wiederholung erforderlicher Schritte der Arbeitspakete 6 bis 8 bis zur finalen Reife des Demonstrators 1.0 (M3), Bau und Test des praxistauglichen Demonstrators 2.0

**AP9 (Praxisphase und Abschlusstest):** Testläufe unter realen Bedingungen, erneute Anpassung, Validierung und Verbesserung der Hard- und Software bis zur finalen Reife Demonstrator 2.0 (M4)

**AP10 (Evaluationsphase):** Evaluation des gesamten Vorhabens, Ausarbeitung von Ergebnispräsentationen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu AP5, AP6 und AP7)

**TMB:** Für die Fertigstellung des Demonstrators 1.0 wurde die komplette Fördertechnik (Rollenförderband, Drehtisch, Fasskippanlage) sowie die optischen Erfassungssysteme (Kameras und Laserlichtschnittsensor) und Beleuchtungen innerhalb des Containers eingebaut.



- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1 | 20ft Container mit seitlichem Rolltor |
| 2 | Rollenförderband                      |
| 3 | Drehtisch                             |
| 4 | Fasskippanlage                        |
| 5 | Lineareinheit                         |
| 6 | Kameras und Laserlichtschnittsensor   |
| 7 | Beleuchtung                           |

In Rahmen des Demonstrators 1.0 wird die gesamte Fassgebinde-Inspektion im Halbautomatik-Modus ablaufen. Dies erfolgt nach Auswahl des entsprechenden Hauptbefehls auf einem externen Controlpanel, bei dem entweder der Fassmantel, der Fassdeckel oder der Fassboden inspiziert werden. Auf diese Art und Weise wurde in der Test- und Kalibrierungsphase die optische Aufnahmequalität ermittelt, angepasst und im Nachgang final festgelegt. Die Anlagensteuerung erfolgt durch eine Siemens SPS Programmierung inklusive Sensorik, Bedienungs- und Steuereinheiten. Die Digitalsignal-basierte Triggerung wurde implementiert. Nach der ersten Versuchsdurchführung wurde das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung, welche für die Aufnahmen der Kameras erforderlich ist, nachträglich in die Steuerung integriert. Der Abstand der Sensoren (Kameras und Laserschnittsensoren) zum Fass wurde um ca. 10 cm verkürzt, da dies genauere Ergebnisse liefert. Die Verkabelung für die Verbindung von Sensoren und Rechner wurde montiert.

**IPF:** Seitens des IPF wurde mit der Inbetriebnahme der Kameras (2D) und Lichtschnittsensoren (3D) begonnen. Hierbei war zunächst zu überprüfen, ob der Bild- und Dateneinzug in der für industrielle Anwendungen üblichen Vorgehensweise möglich war. Die Daten werden anschließend an den Projektrechner per USB- (Kameras) oder Ethernet-Kabel (Lichtschnittsensoren) zur Weiterverarbeitung übertragen. Dies entspricht weitgehend der

üblichen Vorgehensweise und dem Aufbau industrieller Bildverarbeitungssysteme. Der Bildeinzug der Kameras konnte mit Abstrichen softwareseitig realisiert werden, der Dateneinzug der Lichtschnittsensoren kann ohne Abstriche durchgeführt werden. Jedoch bedurfte dies einer andauernden zusätzlichen Entwicklung einer softwarebasierten Schnittstelle, um den Lichtschnittsensor vollumfänglich nutzen zu können. Hierauf wird im Punkt „Aufgetretene Probleme und Schwierigkeiten“ weiter eingegangen.

Die Kameras wurden hinsichtlich radiometrischer und geometrischer Gesichtspunkte eingestellt, sodass die aufgenommenen Bilder eine bestmögliche Grundlage zur Bildanalyse darstellen. Die gesamte auszuliefernde Software wird voraussichtlich in der Programmiersprache Python geschrieben sein. Dafür wurden bereits einige Konzepte zum strukturellen Aufbau der Software sowie die Nutzung sog. „Third-Party-Libraries“, also Programmierbibliotheken von Drittanbietern, evaluiert. Wie bereits weiter oben angedeutet, hat sich außerdem die Notwendigkeit ergeben, eine neue Schnittstelle zum Lichtschnittsensor zu entwickeln. Diese Schnittstelle ist in der Programmiersprache C implementiert und wird in die Python-Software integriert. Die Programmiersprache C wird deswegen notwendig, weil ein mit der Hardware mitgeliefertes SDK (Software Development Kit) bereits in dieser Sprache vorliegt. Die Nutzung der beiden Programmiersprachen Python und C innerhalb einer Software wurde bereits erfolgreich durch den Entwickler getestet.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammunkten)**

Etappenweise wird der dritte Meilenstein „Dateneinzug, Kalibrierung und Bild-/ Datenanalyse“ angegangen. Das Hauptaugenmerk liegt zunächst auf einem einwandfreien Dateneinzug. Hierzu muss die Lichtschnittsensor-Schnittstelle so weit entwickelt werden, dass die Daten fehlerfrei übertragen werden. Die Übertragung konnte bereits erfolgreich getestet werden. Für die Kameras ist noch ein Verfahren zu entwickeln, welches den Bildeinzug anhand der Beleuchtungssituation steuert. Anschließend soll eine Kalibrierung der Sensorik erfolgen. Diese umfasst mindestens die sogenannte „innere Orientierung“ der Kameras sowie die „relative Orientierung“ aller Sensoren zueinander. Geplant ist außerdem, dass parallel dazu bereits Bildanalyse-Verfahren auf Basis eines Fassoberflächen-Klassifikationsschemas entwickelt werden.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

- KONTEC, vom 25. bis 27. August 2021 in Dresden, Poster zu „*EMOS – Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebände*“
- DEM, vom 13. bis 15. September 2021 in Avignon – Frankreich, Vortrag
- SafeND, vom 10. bis 12. November 2021 in Berlin, Vortrag „*Development of a mobile, automated, optical inspection system for radioactive drums*“
- IAEA, (Virtual Event) International Conference on the Safe and Secure Transport of Nuclear and Radioactive Materials vom 13. bis 17. Dezember 2021, Vienna - Austria, Poster zu EMOS

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH (Framatome)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO®) Teilprojekt: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahes Rückbauszenario	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 462.296,53 €
<b>Projektleiter/-in:</b> M.Sc. Sebastian Kohn	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:virero@framatome.com">virero@framatome.com</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklidspezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Der Tätigkeitsschwerpunkt seitens Framatome liegt in der Befähigung von Robotertechnologien zur effizienten Nachkonditionierung. Hierfür stehen neben einem adaptiven System, eine exakte Umgebungserfassung und -repräsentation sowie eine intuitive Bedienbarkeit im Fokus.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabensbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in 5 Arbeitspakete (AP): AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“.

In AP1a) ist Framatome gemeinsam mit dem FAPS verantwortlich für Planung und Aufbau der Versuchsanlage zur räumlichen Charakterisierung. Außerdem ist Framatome in AP1b) zuständig für die gemeinsame Funktionsintegration der Teilergebnisse in die Versuchsanlage. In AP1c) wird federführend durch Framatome gemeinsam mit den Partnern eine abschließende Bewertung des Gesamtvorhabens durchgeführt. Framatome ist hauptverantwortlich für AP2, indem die Verfügbarkeit von Basisfähigkeiten und deren Erweiterung im Fokus stehen. Dies beinhaltet in AP2a) die Steigerung der Genauigkeit der Punktwolken und die vollständige Umgebungspräsentation in der VR. In AP2b) entwickelt Framatome mit dem FAPS eine interoperable Bewegungssteuerung und implementiert eine Echtzeit-Kollisionsvermeidung der beteiligten Roboter. Eine benutzerfreundliche VR-Schnittstelle zur Steuerung autonomer Roboterfunktionen wird in AP2c) erarbeitet und die Entwicklung einer Simultanteleoperation mehrerer Roboter wird in AP2d) adressiert. In AP4 ist Framatome gemeinsam mit dem AiNT und dem FAPS verantwortlich für die räumliche Teile-Charakterisierung und deren finale Fusion zum digitalen Teilezwilling.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

Noch ausstehende Arbeiten in Bezug auf AP1a) konnten im Berichtszeitraum durchgeführt werden, verschiedener Greifer konnten gemeinsam mit dem FAPS implementiert und anschließend getestet werden. Ebenso konnte die Einbindung der externen Achse in die VR-Darstellung und deren Ansteuerung über die VR-Welt gemeinsam durchgeführt werden.

In AP2a wurde bereits in den vorherigen Berichtszeiträumen damit begonnen unterschiedliche Verfahren zu erproben mit dem Fokus die Fusion in der VR-Darstellung von bekannten Teilen anhand von CAD-Daten mit derjenigen von unbekanntem Teilen in einer für den Operator optimal angepassten Sichtweise zu generieren. Für die Darstellung der unbekanntem Teile innerhalb der VR wurden nun mehrere Optionen weiterentwickelt, so können erstens die durch die Bildsensoren erzeugten Punktwolken direkt in der VR dargestellt werden. Zweitens wurde das bereits im letzten Halbjahresbericht erwähnte StereoWarp-Verfahren weiterentwickelt und erfolgreich getestet, dabei wird zu den Punktwolken ein detailgetreues Stereobild gerendert, das sich der Blickrichtung des Operators anpasst.

Zusätzlich steht noch der reine Stereoskopie-Ansatz, wie er zum Beispiel bei der 3D-Bildwiedergabe verwendet wird, als dritte Option zur Verfügung. Diese drei Optionen sollen für den Operator über das in der Virtuellen Realität zugängliche Menü situationsbedingt ausgewählt werden können.

Alle drei Verfahren wurden am Framatome eigenen Versuchsstand untersucht und die Ergebnisse insbesondere zur Fusion der Messdaten der mitbewegten und stationären Sensoren, sowie die Kalibrierung und Optimierung hin zu einer möglichst exakten und dichten Punktwolke als erfolgsversprechend bewertet.

Finale Tests an der großen Versuchsanlage am FAPS konnten bisher nur für die reine Punktwolkendarstellung mit fusionierten CAD-Daten der bekannten Komponenten getestet werden, für die blickrichtungsabhängigen Verfahren muss zunächst noch eine mitgeführte Kamera eingebunden werden.

Die bereits im vorherigen Berichtszeitraum getroffene Entscheidung eine vom Roboterhersteller unabhängige Roboteransteuerung zu entwickeln wurde weiterverfolgt, optimiert und erfolgreich in der Versuchsanlage getestet. Im Rahmen eines digitalen öffentlichen Projekttreffens konnte die Roboteransteuerung erfolgreich live demonstriert werden, so wurde gezeigt, wie ein Operator über die VR komplexe Handhabungsschritte mit dem Roboter tätigt.

Bei der räumlichen Charakterisierung in AP4 steht Framatome eng im Austausch mit FAPS. Hier konnte, wesentlich früher als geplant, AiNT mit einbezogen werden, da AiNT nun auch einen Sensor zur räumlichen Charakterisierung in Ihrem Teil der Versuchsanlage implementieren

konnte. In Abstimmung mit allen Partnern ist geplant diese Möglichkeit für die Datenfusion in Form von Punktwolken zu nutzen. So stünden schon bei der radiologischen Charakterisierung die räumlichen Daten des zu handhabenden Teiles in hoher Auflösung zur Verfügung.

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

Die im Berichtszeitraum erreichten Ergebnisse zur exakten Umgebungsrepräsentation aus AP2a) Verfahren zur VR-Darstellung und aus AP2b) Roboteransteuerung wurden, wie in Kapitel 3 erwähnt, bereits erfolgreich getestet. Noch ausstehend und als nächstes geplant sind Tests bzgl. der beiden auf Stereoskopie basierenden Verfahren zur Darstellung der VR an der Versuchsanlage am FAPS, entsprechend AP1b). Diese Testergebnisse werden, soweit ohne Kollisionskontrolle möglich, evaluiert. Finale Tests und eine entsprechende Validierung sind gemeinsam mit der Evaluierung der Kollisionskontrolle geplant (Meilenstein C).

Die bereits begonnenen Arbeiten zur Kollisionskontrolle in AP2b) werden in Richtung einer dynamischen Version weitergeführt und finden nach derzeitigem Stand termingerecht, wie erwähnt mit anschließender Erprobung und Evaluierung, zu Meilenstein C statt.

In AP4 kooperieren FAPS und Framatome gemeinsam mit AiNT bei der Punktwolke-Generierung und der dazugehörigen orts- und zeitabhängigen Dokumentation, hierzu ist ein gemeinsamer Workshop geplant.

Diese Punktwolke des 3D-Laserscanners bei AiNT wird als Grundlage für die weitere Verarbeitung und damit für den Digitalen Zwilling getestet und gemeinsam bewertet.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Ein Bezug zu ROBDEKON (BMBF 13N14675) ist vorhanden. Seit Projektstart haben sich aber keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben. Die Verbundpartner werden an öffentlichen Veranstaltungen zu ROBDEKON, soweit sie stattfinden, teilnehmen.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

/1/ S. Reitelshöfer et al.: „Robotic Technologies for Volume-Optimized Conditioning of Radioactive Waste – VIRERO“, ICOND 2021, Aachen, 18. - 21. October 2021.

/2/ FAIM 2021 Andreas Blank et al.: “Hybrid Environment Reconstruction Improving User Experience and Workload in Augmented Virtuality Teleoperation”, FAIM 2021, Procedia Manufacturing

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vlrtual REmote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Ortsaufgelöste radiologische Charakterisierung zur Sortierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 301.960,83 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Christopher Helmes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> helmes@nuclear-training.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklidspezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt das Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Der Entwicklungsschwerpunkt der AiNT ist die Entwicklung und Erforschung von automatisierten Verfahren der Aktivitätsbestimmung basierend auf der Fusion der räumlichen und radiologischen Charakterisierung der zu sortierenden Reststoffe oder Abfälle. Hierbei ermöglicht der Einsatz von ODL-Messsonden, Szintillationsdetektoren und Halbleiterdetektoren eine Charakterisierung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Reststoffen bis hin zu Hochdosisleistungsabfällen. Die entwickelten Messverfahren sind insbesondere dafür geeignet Hot-Spots in radioaktiven Abfällen ortsaufgelöst zu detektieren, radionuklidspezifisch zu charakterisieren und robotergestützt zu separieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabensbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in 5 Arbeitspakete: AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“. Im Rahmen des Projekts ist AiNT allein verantwortlich für AP3 „Radiologische Charakterisierung“: In Unterarbeitspaket 3a) werden die Messanlage geplant und errichtet sowie die Detektoren für die Aktivitätsrekonstruktion modelliert. Unterarbeitspaket 3b) beinhaltet die Messanlage für die radiologische Charakterisierung in Betrieb zu setzen, zu kalibrieren und den Testbetrieb. Unterarbeitspaket 3c) umfasst die Softwareentwicklung für die automatisierte Steuerung der Messanlage, wie auch für die orts aufgelöste Aktivitätsrekonstruktion. Zusätzlich ist die AiNT in Arbeitspaket AP4b) „Datenfusion und Zwilling“ gemeinsam mit dem FAPS eingebunden.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

### AP3a) Planung Messanlage und Detektormodellierung

Die Energiekalibrierung des HPGe-Detektors wurde abgeschlossen. Anschließend erfolgte die experimentelle Bestimmung der Photopeakeffizienzen für bekannte Nuklide mittels Kalibrierquellen. Ein initiales Detektormodell zur simulativen Bestimmung der Photopeakeffizienzen wurde mit den experimentell bestimmten Photopeakeffizienzen verglichen und iterativ angepasst, um eine höhere Übereinstimmung zu erzielen. Die Detektormodellierung für den HPGe-Detektor wurde in KW39 abgeschlossen. Nach erfolgreichen Wechseln der Detektoren sind auch die beiden Szintillationsdetektoren anhand von Messungen des Untergrunds sowie Messungen mit mehreren punktförmigen Kalibrierquellen energiekalibriert worden. Auch hier erfolgte eine Bestimmung der experimentellen Photopeakeffizienzen mit dem Ziel, die Datengrundlage zu generieren, um die Detektormodelle zu optimieren. Die initialen Simulationsmodelle für den NaI(Tl)-Detektor und den CeBr3-Detektor wurden erstellt und die Optimierung der Detektorparameter begonnen. Mittels dieser Optimierung wird eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der für die Aktivitätsrekonstruktion relevanten Photopeakeffizienzen erzielt. Eine akkurate Bestimmung der Photopeakeffizienzen reduziert bei der Aktivitätsbestimmung Scheinaktivitäten.

### AP3b) Kalibrierung & Testbetrieb

Die Energiekalibrierung des HPGe-Detektors und der beiden Szintillationsdetektoren erfolgte mittels einer Co-60-Punktquelle mit bekannter Aktivität. Für die Optimierung der Detektormodelle wurde jede Quelle in unterschiedlichem Abstand zum Detektor gemessen und die aus den Messungen erhaltenen Photopeakeffizienzen als Eingangsparameter für die Anpassung der Parameter des Detektormodells verwendet. Aus Messungen von bekannten Objekten mit dem Laserprofilscanner wurden die Abmessungen dieser Objekte extrahiert, welche mit den realen Abmessungen der Objekte übereinstimmen. Hiermit ist der Laserprofilscanner validiert. Die Volumenquelle wurde in KW49 bestellt, sodass in 2022 mit weiteren Messungen fortgefahren werden kann. Die umschlossene Volumenquelle besteht aus einer in einem Silikonharz fest eingeschlossenen Mischung verschiedener Radionuklide, welche sich in einem allseitig dichten Behälter aus Kunststoff befindet. Mit dieser Volumenquelle kann erstmalig die Quellenselbstabschirmung in die Aktivitätsrekonstruktion mit einbezogen werden.

### AP3c) Softwareentwicklung

Für die Steuerung der Versuchsanlage wurde ein erster Prototyp der Steuerungssoftware anhand eines typischen Anwendungsszenarios (automatisierte Messung an mehreren Messpositionen) implementiert. Der Prototyp steuert den Messschlitten zu vorher bestimmten Messpositionen,

startet die Messungen an der jeweiligen Messposition und speichert die Messergebnisse in einer Datenbank. Für die Steuerungssoftware wurde eine Schnittstelle zu dem digitalen Signalanalysator implementiert. Dies ermöglicht das Auslesen der Signale des HPGe-Detektors sowie des CeBr3-Detektors. Eine finale Erprobung des Prototyps anhand eines zuvor spezifizierten Testfalls steht aus. Für die Verarbeitung der Daten wurde eine SQL-Datenbank implementiert, welche die Verwaltung der Messergebnisse und Analysedaten übernimmt. Die Schnittstelle zu der Datenbank wurde implementiert, sodass alle Module der Steuerungs- und der Auswertesoftware auf die Datenbank zugreifen können.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

##### AP3a) Planung Messanlage und Detektormodellierung

Die Detektormodellierung wird in Q1/2022 abgeschlossen. Hiermit ist das Arbeitspaket AP3a) beendet.

##### AP3b) Kalibrierung & Testbetrieb

Nach erfolgter Kalibrierung aller vier Detektoren erfolgen erste Messungen und manuelle Auswertungen hinsichtlich der Aktivitätsrekonstruktionen an punktförmigen radioaktiven Quellen gemäß eines Experimentierprogramms, welches in der Komplexität stetig ansteigt. Aus den Ergebnissen dieses Experimentierprogramms wird die für das Projektvorhaben vorteilhafteste Art, Messungen durchzuführen, abgeleitet. Anschließend werden auch mithilfe der Volumenquelle Experimente zur Aktivitätsrekonstruktion räumlich ausgedehnter radioaktiver Aktivitätsverteilungen durchgeführt. Der Laserprofilscanner nimmt bis dato einzelne Bahnen des Messtischs auf. Die Weiterarbeit bezieht sich hier auf das Zusammenfügen mehrerer Bahnen zu einer zusammenhängende Punktwolken des Messtischs inklusive Messgut.

##### AP3c) Softwareentwicklung

Aus den radiologischen Messungen an den punktförmigen und ausgedehnten Quellen in AP3b) wird die Aktivität rekonstruiert. Dies dient einer Überprüfung des Verfahrens zur Aktivitätsrekonstruktion, wobei auch räumliche Charakterisierung mitberücksichtigt wird. Die Software zur Steuerung des Detektorschlittens, das Auslesen der Detektoren und die Datenverarbeitung wird weiterentwickelt. Das Datenformat für die multivariaten Messdaten wird implementiert und getestet. Für die Simulation von Photopeakeffizienzen wird die Erzeugung von geometrischen Eingangsdaten aus den zusammenhängenden 3D-Punktwolken des Laserprofilscanners weiterentwickelt.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen der F&E-Projekte QUANTOM® (Förderkennzeichen: 15S9406B) oder ZEBRA (Förderkennzeichen EFE-0800541) hat AiNT bereits Expertise bzgl. nuklearphysikalischer Simulationen und der Aktivitätsrekonstruktion erworben. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung von VIRERO ein.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

/3/ A. Blank et al.: „**Robotic Technologies for Volume-Optimized Conditioning of Radioactive Waste – VIRERO**“, ICOND DIGITAL 2020, Aachen, 24. - 26. November 2020.

/4/ A.Havenith et al.: „**Robotergestützte Sortierung radioaktiver Abfälle zwecks volumenoptimierter Konditionierung – VIRERO**“, KONTEC 2021, Dresden, 25. – 27. August 2021.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vlrtual REMote RObotics for Radiometrie Sorting (VIRERO), Teilprojekt: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 654.221,30 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> joerg.franke@faps.fau.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklidspezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt das Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Die Entwicklung der robotergestützten Sortieranlage, des immersiven und lernfähigen Teleoperationssystems, die räumliche Charakterisierung hochindividueller Handhabungsobjekte sowie autonome Roboterfähigkeiten zur Handhabung und Sortierung der Abfallteile liegen im Forschungsfokus des Lehrstuhls FAPS.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabenbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in fünf Arbeitspakete (AP): AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“. Der Lehrstuhl FAPS ist dabei wie folgt in die F&E-Arbeiten des Gesamtvorhabens involviert:

AP1 (a) bis (c): Planung, Aufbau und Optimierung der Versuchsanlage

AP2 (b): Interoperable Fernsteuerung und Kollisionsvermeidung der Roboter

AP4 (a) und (b): Räumliche Charakterisierung und Fusion zum digitalen Teilezwilling

AP5 (a) bis (d): Augmented Reality-Expertensystem sowie autonome Roboterfähigkeiten

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Basierend auf Erkenntnissen aus AP1 (b) und den Resultaten von Tests zum robotergestützten Schneiden von Schrottteilen wurde eine Aufnahme zum Halten von Schrottteilen entwickelt und in die Versuchsanlage integriert. Das System basiert auf einem doppelwirkenden Pneumatikzylinder mit einer maximalen Schließkraft von 3200 N. Das Haltesystem ist über Stahlfedern flexibel gelagert, um eine Einkopplung großer Prozesskräfte den Schneidroboter zu vermeiden. Das gesamte System zum Halten ist in eine lokale Schutzeinhausung integriert, in welche Schneidteile durch einen Vorhang eingebracht werden können. Absplitternde Teile, die bei ersten Versuchen zufällig in die Versuchsanlage geschleudert wurden, können nun in einem Auffangbereich gesammelt werden und von dort mit einem Roboter mittels Teleoperation oder später autonom zuverlässig gegriffen und sortiert werden.

Um eine softwareseitige Kollisionsvermeidung bei autonomen Roboterbewegungen zu ermöglichen, wurden im AP2 (b) zusammen mit dem Partner Framatome weitere Elemente der Versuchsanlage digital nachmodelliert. Auch der durch einen Hubachse bewegte SIA20F Roboter ist nun als dynamisch mitbewegtes Modell in die Onlinekollisionsprüfung integriert, wobei die aktuelle Stellung der Hubachse über OPC-UA ausgelesen wird.

In AP4 (a) wurden weitere Rekonstruktionsalgorithmen für die Oberflächen von unbekanntem Objekten untersucht. Neben dem Elastic-Fusion Ansatz wurden dabei auch Werkzeuge zur Photogrammetrie auf ihre Eignung zur Rekonstruktion von 3D Objekten unter den spezifischen Rahmenbedingungen in der Versuchsanlage betrachtet. Im Ergebnis eignen sich SLAM Algorithmen wie Elastic-Fusion zur Erstellung grober Modelle für eine einfache Kollisionserkennung. Ansätze zur Photogrammetrie liefern bessere Modelle in Abhängigkeit der Anzahl der Eingangsbilder und der erlaubten Rechenzeit. Diese können auch für Ansätze zur Datenfusion in AP4 (b) zusammen mit dem Partner AiNT genutzt werden. Eine abschließende Bewertung der Rekonstruktionsqualität durch die Ermittlung der Wiedererkennungsrates der Modelle in KI-basierten Ansätzen wie YOLO steht noch aus. Als Vorbereitung des Vergleichs auf der Basis der Erkennungsrates von YOLO wurde ein Ansatz zum automatischen Labeln von Trainingsdaten entwickelt. Dabei werden Objekte in einer bekannten Umgebung aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Durch eine Vorschaltung von Filteralgorithmen und durch ein Entfernen der bekannten Bildanteile können automatisch die Objektgrenzen als Eingangsdaten für das Training beispielsweise von YOLO erstellt werden. Somit kann eine größere Menge Trainingsdaten zu neuen Objekten in der Versuchsanlage erstellt werden, wobei für ein Objekt lediglich einmalig die Angabe eines Labels erfolgen muss. Diese Objekterkennung bildet ebenfalls die Grundlage um in AP4 (b) eine Fusion von Tiefendaten und Aktivitätskarten für Objekte im Arbeitsraum durchzuführen. Zur Unterstützung der Umgebungs- und Bilderfassung wurde weiterhin eine LED Beleuchtung in die Versuchsanlage integriert.

In AP5 (a) konnte bei Arbeiten zur Mensch-Maschine-Schnittstelle in der Augmented Reality Umgebung eine erweiterte Navigationshilfe umgesetzt werden. Bei der Auswahl von Elementen

aus der Menüstruktur kann nun ein interaktiver Richtungspfeil zum Auffinden des entsprechenden Objektes oder einer gewählten Komponente in der VR Umgebung eingeblendet werden. Weiterhin wurden spezielle UI Elemente zur effizienten Nutzung der VR Umgebung prototypisch umgesetzt. Bewegungen der Roboterachsen eines ausgewählten Systems können nun zusätzlich über virtuelle Schaltelemente oder durch eine entwickelte Gestensteuerung ausgelöst werden. Unter anderem für diese Elemente wurde eine Nutzerstudie mit mehreren Probanden durchgeführt. Weiterhin wurde ein UI Konzept zum Einzeichnen einer Linie für Trajektorien oder zur Markierung von Bereichen sowie UI Elemente für das Konfigurieren der Darstellungsoptionen einer Heatmap umgesetzt.

In AP5 (b) wurde die Auswertungen eines Vergleichs der Ansätze GG-CNNv1 und GG-CNNv2 abgeschlossen. GG-CNNv2 hat sich als gut nutzbar erwiesen, um auch bei unbekanntem Objekten Greifpunkte zu bestimmen. Die Visualisierung der Greifpunkte für Nutzende erfolgt aktuell noch in einem grafischen Interface an einem der Steuerungsrechner. Die Integration der Visualisierung der Greifpunkte in die VR Umgebung ist noch nicht abgeschlossen. Um eine robuste Greifpunktermittlung bei Schrottteilen umzusetzen, musste weiterhin eine dynamische Kameraführung durch einen Roboter umgesetzt werden, da in Abhängigkeit der Teilegröße unterschiedliche Kameraabstände zu besseren Erkennungsleistungen führen. Weiterhin wurde für eine stabile Anzeige von ermittelten Greifpunkten eine Durchschnittswertbildung der Positionen der Greifpunkte umgesetzt. Als Vorbereitung für autonome Funktionalitäten und zur weiteren Verbesserung der in VR dargestellten Zusatzinformationen wurden verschiedene Klassifizierungs- und Segmentierungsansätze untersucht. Neben Varianten von YOLO wurden die Ansätze Poly-YOLO und YOLACT hinsichtlich ihres Verhaltens bei unbekanntem Teilen untersucht. Erste Zwischenergebnisse deuten darauf hin, dass mit YOLACT auch für unbekannte Teile eine gewisse Segmentierungshilfe als farblich dargestelltes Overlay für Nutzenden möglich sein kann. In diesem Zusammenhang wurde auch deutlich, dass großflächige spiegelnde Flächen in der Anlage wie zum Beispiel der Tisch eine Nutzung von Algorithmen aus dem Stand der Technik zur Objekterkennung und Segmentierung unmöglich machen. Daher wurden Untersuchungen zu möglichen Untergründen für den Tisch durchgeführt. Schließlich wurden Gummimatten für die Tischoberflächen zugeschnitten und integriert. Durch eine Nachbehandlung in Form eines Anrauens tragen diese austauschbaren Komponenten zu einer besseren Qualität der Rohdaten der genutzten optischen Sensoren und zu einer robusten Funktion nachgeschalteter Algorithmen bei.

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

In AP1 (a) sind weitere Tests am Gesamtsystem geplant, um die neu hinzukommenden Funktionalitäten bei der Unterstützung von Nutzenden und hinsichtlich der autonomen Fähigkeiten zu bewerten.

In AP4 (b) wird weiter an der Datenfusion aus der Umgebungserfassung und der radiologischen Charakterisierung gearbeitet. Dazu ist unter anderem ein gemeinsamer Workshop mit den Partnern von Framatome und AiNT zur Erfassung der Daten und zu möglichen Datenformaten geplant. Weiterhin wird die Bewertung der verschiedenen Rekonstruktionsansätze für Objektoberflächen mittels der jeweiligen Erkennungsleistung der Modelle durch vortrainierte YOLO Instanzen durchgeführt.

In AP5 (b) wird an der Darstellung der erkannten Greifposen in der VR Umgebung als Unterstützung von Nutzenden weitergearbeitet. Weiterhin werden Algorithmen zur Segmentierung von Bereichen untersucht um weiter Zusatzinformationen über Teile im Arbeitsraum für Nutzende darstellen zu können. Diese Arbeiten dienen gleichzeitig als Basis zur Umsetzung erster autonomer Greifvorgänge. Schließlich werden hierzu auch die entwickelten

Ansätze zur Bauteilerkennung und zum automatischen Labeln genutzt um die Erkennungs- und Greifplanungssysteme auf neue Beispielteil zu trainieren.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Seit Projektstart haben sich keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Reitelshöfer et al. - Vortrag ICOND 2021 - Tele-Operation of Multi-Robotic Systems with Augmented Virtuality for Semi-Automated Handling and Cutting of Radioactive Waste

Andreas Blank et al.: "Hybrid Environment Reconstruction Improving User Experience and Workload in Augmented Virtuality Teleoperation", FAIM 2021, Procedia Manufacturing

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9432
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Darmstadt	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines bildgebenden, zerstörungsfreien Analyse- und Deklarationsverfahrens, für radioaktive Abfallgebinde, basierend auf lasergetriebenen Neutronenquellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 477.148,65 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Markus Roth	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> markus.roth@physik.tu-darmstadt.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Endlagerstätten ist es notwendig, dass deren Inhalt sowohl radiologisch, stofflich als auch strukturell charakterisiert wird. Während radiologische Komponenten durch deren charakteristische Emission von Gamma-Strahlung bestimmt werden können, existiert bisher kein zerstörungsfreies Verfahren, um die Zusammensetzung und die interne räumliche Struktur von Abfallgebinden zu bestimmen.

Zielsetzung dieses Vorhabens ist es daher, ein bildgebendes Analyse- und Deklarationsverfahren für Abfallgebinde auf der Basis von schneller Neutronen-Radiographie zu entwickeln. Während die grundlegende Funktionalität dieser Methode bereits im Rahmen des Forschungsverbundprojekts NISRA mithilfe eines Neutronengenerators bestätigt wurde, konzentriert sich dieses Vorhaben auf die Verwendung lasergetriebener Neutronenquellen. Diese ebenfalls kompakten Quellen besitzen das Potential, drei bis vier Größenordnungen höhere mittlere Neutronenflüsse zu erzeugen. Zusammen mit der geringeren Quellgröße und den höheren Neutronenenergien ist außerdem eine Charakterisierung mit einer verbesserten räumlichen Auflösung und stark verkürzten Messzeiten zu erwarten. Mit dieser Methode wird eine Charakterisierung der Abfallgebinde am Ort der Endlagerstätte möglich.

Effiziente lasergetriebene Neutronenquellen basieren auf einem Zweistufenprozess. Im ersten Schritt werden Protonen oder auch schwere Wasserstoff Ionen (Deuteronen) durch die Wechselwirkung eines Femtosekunden-Laserpulses mit einem Target beschleunigt. Das Target Material ist typischerweise eine etwa ein Mikrometer dünne Folie für Experimente bei geringer Wiederholfrequenz; oder ein sogenanntes *Liquid Leaf Target*, welches als dünnes flüssiges Blatt die Eigenschaft hat sich am Ort der Wechselwirkung schnell zu regenerieren und daher auch für sehr hohe Frequenzen, d.h. quasi CW-Betrieb geeignet scheint. Die beschleunigten Deuteronen treffen im zweiten Schritt auf einen Konverter, zum Beispiel ein Zentimeter dicker Block aus Beryllium oder Lithiumfluorid, um dort durch Kernreaktionen einen gerichteten Neutronenstrahl zu erzeugen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Bez.	<b>Entwicklung eines hochrepetitiven Targets</b>
T-1	Einarbeitung in Themengebiet und Literaturrecherche
T-2	Anpassung des Jet-Design auf Laserenergien im J-Bereich
T-3	Bestellen und Aufbau der Komponenten
T-4	Überprüfung der Stabilität und Jet-Dicke an Luft
T-5	Aufbau und Betrieb innerhalb einer Vakuum-Kammer
T-6	Parameterstudien zur Stabilität und Vakuumlast
T-7	Implementierung eines Düsen-Schutzkonzeptes
T-8	Planung zur Anwendung innerhalb eines Experimentes
T-9	Beschleunigung von Ionen an einem hochrepetitiven Laser
T-10	Auswertung der Ergebnisse und Abschlussbericht
	<b>Erzeugung schneller Neutronenpulse</b>
N-1	Optimierung des Konverter- und Kollimator-Designs
N-2	Monte-Carlo Simulationen zur Experimentoptimierung
N-3	Experimentplanung
N-4	Vermessung des Einflusses der Laserparameter
N-5	Auswertung und Vergleich zu Simulationen
N-6	Erzeugung von Neutronen an Lasersystemen >> 10Hz
	<b>Detektorentwicklung zur Neutronenradiographie</b>
D-1	Einarbeitung in Themengebiet und Literaturrecherche
D-2	Design, Auswahl und Beschaffung der Komponenten
D-3	Aufbau eines faserbasierten N- und X-Ray Detektors
D-4	Parasitäres Testen an Laserquellen auf EMP Verträglichkeit
D-5	Aufnahmen von Radiographien im Hz-Bereich
D-6	Automatisierung der Datenaufnahme und Auswertung
D-7	Kalibrierung an konventioneller Neutronenquelle
D-8	Experimentplanung an hochrepetitiver Laser-Quelle
D-9	Auswertung der Daten und Abschlussbericht
	<b>Design kompakter Laser-Neutronen-Radiographie Anlage</b>
R-1	Marktrecherche zu geeigneten Laser-Systemen
R-2	Rechnungen zu benötigter Strahlenabschirmung
R-3	Aufnahme eines 200l Gebinde Testobjektes
R-4	Berechnung der benötigten Neutronenflüsse
R-5	Erstellen eines Gesamtkonzeptes

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Obige Tabelle zeigt den Arbeitsplan aufgliedert nach Teilprojekten. Obschon thematisch verbunden, können die Teilbereiche größtenteils unabhängig voneinander abgearbeitet werden. Während der ersten Monate haben sich die Projektbearbeitenden in das Themengebiet eingearbeitet (D-1), insbesondere mit Blick auf den Bereich der Detektorentwicklung für die Diagnostik schneller Neutronenpulse (N-1). Das Konzept eines auf vielen, einzeln auslesbaren Photomultipliern beruhenden Detektors wurde erstellt, geeignete Komponenten für diesen wurden ausgewählt und bestellt (D-2). Ebenso führten wir bereits im Oktober und November 2021 ein Experiment am CLPU in Salamanca durch, bei dem Protonen mit einem intensiven Laser beschleunigt wurden. Dies mit einem sogenannten „Liquid Leaf“ Target, welches für den Betrieb bei hoher Wiederholfrequenz geeignet ist (T-1). Teile der Elektronik konnten während dieses Experimentes bereits mit Blick auf EMP Verträglichkeit geprüft werden (D-4).

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Mit den bereits gelieferten Komponenten (32 Kanal ADC / 64 Kanal Photomultiplier / VME crate) wird in Zusammenarbeit mit der Elektronikwerkstatt des Instituts für Kernphysik das PFN (pulse forming network) implementiert, so dass die Einzelkomponenten verbunden und als Detektor für die orts aufgelöste, schnelle Messung und Verarbeitung der Datensignale für unser nächstes Experiment an der Neutronenquelle nELBE zur Verfügung stehen. Diese Ausleseeinheit wird dann mit einem Array aus szintillierenden Fasern verbunden, welche ihrerseits im Experiment durch Neutronen angeregt werden (D-2 / D-3). Im Detektor- und Targetlabor des Instituts für Kernphysik, TUDa wird in einem Testaufbau mit einem radioaktiven Substrat als Ersatzquelle die Eigenfunktion des Detektors bestimmt und dessen Funktionsweise getestet werden. Die Ergebnisse dieser Messungen gehen zusammen mit Simulationsrechnungen (N-2) in die Optimierung des Konverter- und Kollimator-Designs (N1) und in die allgemeine Experimentplanung (N-3) ein. Ebenso wird die Ansteuerung und effiziente Auslese der Daten aus dem ADC programmiert und getestet werden, dies insbesondere im Hinblick darauf, dass zukünftig bei radiographischen Messungen im Hz-Bereich (D-5) die Datenaufnahme, Verarbeitung und Auswertung zu einem hohen Grad automatisiert (D6) erfolgen muss.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des LOEWE Schwerpunktes *Nuclear Photonics* am Institut für Kernphysik wurden bereits Vorarbeiten geleistet zur Entwicklung eines hochrepetitiven Targets, des sogenannten *Liquid Leaf* Targets (T-1). Die Zusammenarbeit wird weitergeführt. Im Rahmen dieses FORKA Projektes sind keine Investitionsmittel vorgesehen, mit denen ein neues *Liquid Leaf* Target aufgebaut werden könnte. Jedoch Sachmittel und insbesondere Personal (2/3 FTE) um das bestehende System hinsichtlich Stabilität im Vakuum-Betrieb bei hoher Wiederholfrequenz und signifikanter Laserenergie pro Puls zu optimieren (T-2). Dies ist notwendig und Teil des Arbeitspaketes „Erzeugung schneller Neutronenpulse“ sowie des zusammenfassenden Arbeitspaketes „Design einer kompakten Laser- Neutronen Radiographie Anlage“.

Ebenso steht dieses Vorhaben in Bezug zu dem vom BMBF geförderten Projekt 05P19RDF A1 mit der Bezeichnung „Verbundforschungsantrag von Gruppen der Technischen Universität Darmstadt zum Aufbau und Forschung an FAIR // HED@FAIR.DA“. Unter anderem wurde dort ein neuartiger Detektor entwickelt und zum Patent angemeldet, welcher mit hoher Repetitionsrate die räumliche Verteilung von Protonen energiewahlweise messen kann. Dieser Detektor wird aktuell mit Eigenmitteln unserer Arbeitsgruppe weiterentwickelt, ein zweiter Prototyp soll zeitnah im Detektor- und Targetlabor des Institut für Kernphysik gebaut werden. Für die Optimierung des Konverter- und Kollimator-Designs (N-1) mit Blick auf die Konversionseffizienz von Protonen in Neutronen, ist Charakterisierung des aus dem *Liquid Leaf* heraus mit intensiven Laserpulsen beschleunigten Protonenstrahls eine wesentliche Voraussetzung.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Zimmer, M., et al. “Analysis of laser-proton acceleration experiments for development of empirical scaling laws.” *Physical Review E* 104.4 (2021): 045210.
- Hesse, M. et al. Spatially resolved online particle detector using scintillators for laser-driven particle sources. *Rev. Sci. Instruments* 9 (2021).
- Zimmer, M., et al. “Demonstration of non-destructive and isotope-sensitive material analysis using a short-pulsed laser-driven epi-thermal neutron source.” *Nature Comm.* Accepted (2022)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9417
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> USER2 – Umsetzung von Schwermetall-Landfarming zur nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Gewinnung erneuerbarer Energien auf radionuklidbelasteten Flächen: Optimierungsstrategien		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 998.354,40 €	
<b>Projektleiterin:</b> Prof. Dr. Erika Kothe	<b>E-Mail-Adresse der Projektleiterin:</b> erika.kothe@uni-jena.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Nach einer Etablierungsphase soll im vorliegenden Antrag die Möglichkeit einer mikrobiell gestützten Phytostabilisierung zur Erzeugung von Lignocellulose als nachwachsendem Rohstoff auf mit Schwermetallen und Radionukliden (SM/R) belastetem Substrat aus einem ehemaligen Uranbergbau nahe Ronneburg in Ost-Thüringen etabliert werden. Neben Uran werden insbesondere Cäsium und Strontium sowie Thorium und des Weiteren die Lanthanoide als natürliche Analoga für dreiwertige Actiniden untersucht. Damit können auf den etablierten Testflächen die Untersuchungen zur Nutzung verschiedener Baumarten mit einer Unterpflanzung in naturnahen mehrstöckigen Beständen eingesetzt werden, die wachstumsfördernde Nachhaltigkeit des Auftrags von Rendzina auf einem stark belasteten Substrat unter dem Einfluss der SM/R-Speziation und kolloidalen/nanopartikulären Phasen zu untersuchen. Es erfolgen zudem Erosionsbeobachtungen unter Weiterentwicklung automatisierter Erfassungssysteme sowie Biodiversitätsanalysen im Zusammenhang mit optimiertem Baumwachstum. Die Quantifizierung der Erträge und des SM/R-Transfers in die Pflanze erlaubt die Einordnung der angewandten Strategien zur Aufforstung mit Kurzumtriebsplantagen, die auf andere mit SM/R-kontaminierte Standorte übertragen werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

In AP 1 (Nachhaltigkeit der Bodenzuschläge und Änderung der Effekte mit der Zeit) wird das Baumwachstum und der Effekt aufsteigender, kontaminierter Wässer längerfristig mit dem Einfluss der Inokulation korreliert und Analysen von europäischen Vergleichsstandorten zur Übertragbarkeit der Ergebnisse durchgeführt.

AP2 (Weiterentwicklung und Etablierung einer automatisierten Dokumentation) dokumentiert die Veränderungen mit einem Multiscanner- und LIDAR-System zur digitalen Kartierung von Wachstum und Vitalitätsfaktoren.

AP 3 (Stickstofffixierung durch Anpflanzen von Wirtspflanzen) widmet sich stickstofffixierenden Bakterien und der Stickstoffspeziation in Grund- und Porenwässern.

In AP 4 (Etablieren einer Bepflanzung auf stark belasteten Standorten) wird Pflanzenwachstum trotz stark belasteter Wässer erreicht werden und reaktiver Transport im Anstrom sowie die Schwermetalltoleranz im Wurzel-Pilzmycel-Bereich untersucht.

AP 5 (Kurzumtriebsplantagen auf trockenen und grobkörnigen Standorten) befasst sich mit Endomycorrhizapilzen und ihrer Kombination mit Ektomykorrhiza und Bodenmikroflora.

AP 6 (Erosionsschutz durch Unterpflanzung) wird Erosion beobachten und der Schutz durch Einsaat von Gräsern auf den Abtrag wird erfasst.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

(AP 1, 4 und 5) Nach der Inokulation wurden die Kontrollen zur Etablierung spezifischer Bodenmikrobiome wieder aufgenommen. Zudem konnte in diesem Jahr erneut geerntet werden. Dazu wurden im Dezember 2021 nach der wie geplant im September erfolgten Wachstumskontrollen sowohl auf der Gessenwiese wie am Kanigsberg die Baumbiomasse bestimmt. Proben werden nun wie bereits in 2019 auf den Gehalt an Schwermetallen/ Radioisotopen hin analysiert. Dies erlaubt auf der Gessenwiese die Analyse des Einflusses der ersten Ernte 2019 und am Kanigsberg die weitere Untersuchung nach Änderung des Wuchsverhaltens durch den Rückschnitt.

(AP 2) Die Analysen zur Aufnahme von Schwermetallen im Erntematerial aus 2019 wurde vollständig abgeschlossen. Die automatisierte Erfassung des Baumwachstums und der Bodenverlagerung wurde im September 2021 durchgeführt.

(AP 3) Die Actinorhiza wurde beprobt und es konnte eine sehr gute Etablierung an den Erlen auf der Gessenwiese nachgewiesen werden. Nach dem Austausch der Bodensonden konnten auch weitere Wasserproben gewonnen und analysiert werden.

(AP 4) Die *in vitro*-Systeme und Mikrokosmen für die Etablierung schwermetalltoleranter Mykorrhiza zeigten einen deutlichen Einfluss des Bodens, während die Ektomykorrhizosphäre nur teilweise durch die Baumart bestimmt wurde. Die hydrogeochemische Untersuchung incl. Kolloid- und Nanopartikelcharakterisierung, DOC/DON-Analyse sowie SM/R-Speziation wurden über das Jahr weitergeführt.

(AP 5) Die Mykorrhizierung konnte im Feld bestimmt werden und zeigte eine höhere Biodiversität bei Zumischung von Rendzina sowie eine veränderte Anpassung durch verminderte *long distance*-Morphotypen.

(AP 6) Auf den trockenen und nährstoffarmen Testflächen zur Bestimmung der Erosion und auf dem Plateau am Kanigsberg konnte eine Etablierung einer Bodendeckerschicht gezeigt und in die Analysen einbezogen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeit

AP 1: Die Inokulation soll wie geplant wieder im April/Mai erfolgen. Wurzelhorizonte und Mykorrhizierungsrate sowie -diversität werden weiterhin mit chemischen Parametern zum Boden verglichen, um erste Ergebnisse zu validieren. Die Bonitur des Wachstums nach dem 2. (Gessenwiese) bzw. ersten Schnitt der Bäume auf den Kanigsberg wird im Herbst erfolgen.

AP 2: Die Validierung zur automatisierten Erfassung des Baumwachstums mit Boniturdaten und der Bodenverlagerung erfolgt 2022. Weiterhin werden SM/R-Gehalte der Biomassen aus der Ernte 2021 analysiert und mit den Daten aus 2019 verglichen.

AP 3: Bodenwasseranalysen und Bodenparameter werden bestimmt, um die Nährstoff- bzw. Metallverteilung im Boden und Bodenwasser genauer zu charakterisieren.

AP 4: Die Parameter werden weiterhin erfasst und ausgewertet, um Veränderungen im Jahresverlauf aufzuzeigen. Die Assoziation von SM/R mit spezifischen org. Fraktionen (aus der LC-OCD-OND) mittels ICP-MS wird weiter analysiert.

AP 5: Co-Kulturen, Mikrobiomanalysen, Wasser- und Nährstoffaustausch durch Untersuchung stabiler Isotope werden weitergeführt.

AP 6: Die Analyse der Baumgesundheit wird mit Daten der Chlorophyll-Analysen korreliert.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt basiert auf durch das BMBF geförderten, abgeschlossenen Projekten (Baubio, Phytorest, Strahlung und Umwelt II, Teilprojekt C, FKZ: 02NUK015C; Transaqua, FKZ: 02NUK030C; USER, FKZ: 15S9194).

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Abdulsalam O, Ueberschaar N, Krause K, Kothe E. 2021. Geosmin synthase ges1 knock-down by siRNA in the dikaryotic fungus *Tricholoma vaccinum*. *J Basic Microbiol* 10.1002/jobm.202100564 [Epub ahead of print].

Bogdanova O. 2021. Microbial processes in mycorrhizosphere of plants growing at a former uranium mining site. Dissertationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Czeranka S. 2021. Antibiotikaresistenz bei Bodenbakterien an einem schwermetall-belasteten Standort. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Harpke M, Pietschmann S, Costa FS, Gansert C, Langenhorst F, Kothe E. 2021. Biomineralization by extremely halophilic and metal-tolerant community members from a sulfate-dominated metal-rich environment. *Microorganisms* 10: 79.

Köppner N. 2021. Untersuchungen zum Verhalten von Amino-G-Säure als Fluoreszenztracer auf AMD-beeinflussten Substraten im ehemaligen Uranabbaugebiet Ronneburg. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Mitchell C. Einfluss verschiedener Stressoren auf Wachstum und Genexpression von Streptomycceten. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Murry R, Traxler L, Pötschner J, Krüger T, Kniemeyer O, Krause K, Kothe E. 2021. Inositol signaling in the basidiomycete fungus *Schizophyllum commune*. *J Fungi* 7: 470.

Nettemann S, Mirgorodsky D, Lenk K, Kothe E, Schäfer T. 2021. A first look at colloid-associated trace metals of AMD-influenced waters in a short-rotation forestry field experiment. Goldschmidt Conference (Virtual), July 4-9 2021, Abstract No. 4341.

Nettemann S, Mirgorodsky D, Kothe E, Schäfer T. 2021. DOC and DON characterization in AMD-influenced waters in a short-rotation forestry field experiment. 19th (Online) Symposium on Remediation. October 4-5 2021.

Papsdorf R. 2021. Untersuchung kolloidaler anorganischer und organischer Phasen und Spurenelementen im AMD-beeinflussten Grundwasser am Kanigsberg. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Traxler L, Shrestha J, Richter M, Krause K, Schäfer T, Kothe E. 2022. Metal adaptation and transport in hyphae of the wood-rot fungus *Schizophyllum commune*. *J Hazard Mater* 425: 127978. [Epub ahead of print doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127978].

Traxler LC. 2021. The potential of *Schizophyllum commune* for mycoremediation at the Chernobyl Exclusion Zone. Dissertationsschrift, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9414A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) – Teilvorhaben: Methodische Konzeptionierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 658.953,60 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Rebekka Volk	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> rebekka.volk@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen rückt sowohl national als auch international in den Fokus der Energie- und Rückbauwirtschaft. Bereits abgeschlossene und noch laufende kerntechnische Rückbauprojekte weisen auch aufgrund von unzureichender Planung teilweise extreme Zeit- und Kostenabweichungen von der ursprünglichen Planung auf. Daher ist es das Ziel des Verbundvorhabens NukPlaRStoR, ein Planungswerkzeug zu entwickeln, das speziell auf die Bedürfnisse kerntechnischer Rückbauprojekte abgestimmt ist und die Planung wesentlich vereinfacht. Hierbei sollen alle wesentlichen Anforderungen zur kerntechnischen Rückbauplanung berücksichtigt und mit Hilfe mathematischer Methoden ein optimierender Planungsansatz entwickelt und implementiert werden.

Durch das zu entwickelnde Planungswerkzeug wird ein möglichst optimaler Plan (hinsichtlich der Kosten oder der Zeit und unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen) berechnet, der alle auszuführenden Arbeiten sowie alle während des Rückbaus anfallenden Stoffströme enthält. Ausgehend von den Stoffströmen wird mit Hilfe des Planungswerkzeugs eine logistische Planung (z.B. Transport und Bearbeitung innerhalb der Anlage, inkl. Konditionierung) sowie eine Behälterplanung inkl. Endlagerdokumentation ermöglicht. Des Weiteren soll das zu entwickelnde Planungswerkzeug mit anderen Programmen (bspw. REVK zur Reststoffverfolgung, Microsoft Project oder Oracle Primavera P6 EPPM zur Projektplanung) gekoppelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten im Verbundvorhaben besteht in der Entwicklung einer benutzerfreundlichen Oberfläche des Planungswerkzeugs.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt untergliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP): Zunächst werden Daten aus bereits durchgeführten kerntechnischen und konventionellen Rückbauprojekten gesammelt und aufbereitet (AP 1). Mit Hilfe dieser Daten wird das Planungswerkzeug des abgeschlossenen Verbundvorhabens MogaMaR (Förderkennzeichen: 02S9113A und 15S9113A) getestet, um dessen Praxistauglichkeit nachzuweisen (AP 2). Nachdem der Nachweis erbracht wurde, werden Weiterentwicklungen dieses Planungswerkzeugs vorgenommen, die jeweils mit den Daten getestet und validiert werden. Hierzu wird zunächst eine benutzerfreundliche Nutzeroberfläche erstellt (AP 3), welche die Bedienung des Planungswerkzeugs ohne große Vorkenntnisse ermöglicht und Fehler bei der Verwendung verhindert. Das Planungswerkzeug wird mit Software gekoppelt, welche typischerweise beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt wird, allerdings den Plan nicht optimiert (AP 4). Dazu werden Schnittstellen zwischen dem

Planungswerkzeug und solcher Software geschaffen. Je Vorgang wird bestimmt, welche und wie viele Stoffe zeitlich definiert bei dessen Ausführung anfallen (AP 5). Im Zuge der Abbildung von Stoffströmen im Planungswerkzeug wird eine logistische Planung zum Umgang mit den Stoffströmen entwickelt und implementiert. Dies umfasst eine Reststoff- und Abfallplanung und die dafür benötigten Produktkontrollmaßnahmen (AP 6.1), die Planung von Logistik und Transport, Behandlung und Konditionierung (AP 6.2), eine Behälterplanung (AP 6.3) und die Erstellung einer Endlagerdokumentation (AP 6.4). Außerdem wird das Planungswerkzeug um weitere Funktionen, wie zu berücksichtigende alternative Ausführungsmöglichkeiten (sog. Multi-Mode-Fall) (AP 7.1), die Orte der Vorgangsausführung (AP 7.2) sowie die Berücksichtigung von Verbrauchsressourcen (AP 7.3) und Pufferlagern (AP 7.4) erweitert.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Das KIT hat das im Planungswerkzeug eingesetzte Lösungsverfahren um einen sogenannten Simulated-Annealing-Algorithmus erweitert. Es handelt sich dabei um ein Approximationsverfahren, das einen natürlichen Abkühlungsprozess nachahmt. Berechnungen mit standardisierten, wissenschaftlichen Datensätzen haben gezeigt, dass der Simulated-Annealing-Algorithmus unter bestimmten Umständen bessere Lösungen findet als die bisher im Planungswerkzeug eingesetzten Verfahren. Die Leistungsfähigkeit variiert jedoch in Abhängigkeit von der Problemgröße (d. h. der Anzahl einzuplanender Projektvorgänge) und den gewählten Berechnungsparametern. Deshalb wurde im Sinne der Benutzerfreundlichkeit eine automatische Kalibrierungsfunktion implementiert, welche die Einstellung der Berechnungsparameter selbstständig übernimmt. Obwohl nicht explizit im Arbeitsprogramm vorgesehen, waren die beschriebenen Erweiterungen zur Sicherstellung einer hohen Lösungsqualität erforderlich. Sie werden AP 7 zugeordnet.

Des Weiteren hat das KIT ein Modell zur räumlichen Planung entwickelt (AP6 Weiterentwicklung Logistik). Dieses dient zur optimierten Platzierung von Arbeitsstationen und Materiallagern während des Rückbauprozesses insb. innerhalb der nuklearen Anlage. Dabei soll der benötigte Transport- und Zwischenlageraufwand reduziert werden, was in der Praxis zudem meist auch eine Verringerung der Expositionszeiten des Fachpersonals mit sich bringt. Zusätzlich stellt das Modell sicher, dass alle benötigten Arbeitsstationen und Materiallager erreichbar bleiben und es nicht zu sogenannten Deadlock-Positionen kommt, in denen sich mehrere Vorgänge gegenseitig blockieren und die Blockade erst mit zusätzlichem Aufwand von außen aufgehoben werden muss.

Das Modell basiert auf der in der konventionellen Bauplanung verbreiteten Probleme der Construction Site Layout Problems (CSLPs). Damit werden typischerweise auf Baustellen die Anordnung der Arbeitsflächen und -mittel optimiert, wobei der Raum entweder mit Hilfe eines diskreten Gitters oder kontinuierlich modelliert wird. Um das Modell für Indoor-Anwendungen zu adaptieren, wurde der Raum nun als ein Netzwerkgraph mit einzelnen Räumen modelliert und alle weiteren Modelleigenschaften an die neue Grundstruktur innerhalb von kerntechnischen Anlagen angepasst. Eine lauffähige Version des Modells wurde in Python umgesetzt und mit Testdaten erfolgreich getestet.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im kommenden Berichtszeitraum sieht das KIT Weiterarbeiten an AP 7 vor. Insbesondere soll das bereits implementierte Konzept der kumulativen Ressourcen (AP 7.4) generalisiert werden, sodass es zur Modellierung beliebiger Stoffstromstrukturen herangezogen werden kann. Das bisherige Konzept ermöglicht lediglich die Modellierung divergierender Stoffstromstrukturen, welche typischerweise bei Rückbauprojekten beobachtet werden. Zukünftig sollen auch

Situationen abgebildet werden können, in denen Stoffe zusammenfließen und als neue Einheit weiterbearbeitet werden (bspw. Bauprojekte). Darüber hinaus sind weitere Arbeiten im Zusammenhang mit dem Multi-Mode-Fall (AP 7.1) vorgesehen.

Das entwickelte Logistikmodell (AP 6) soll mit ausführlicheren Testdatensätzen getestet und analysiert werden. Nach Möglichkeit sollen dabei nicht nur selbstgenerierte, sondern auch reale Daten genutzt werden. In Gesprächen mit Industrieexperten wurden zudem mehrere praxisrelevante Erweiterungen für das Logistikmodell identifiziert, die schrittweise in den kommenden Monaten umgesetzt werden sollen. Beispielsweise können im vorhandenen Modell schon verschiedene Materialtypen zu verschiedenen Typen von Arbeitsstationen zugeordnet werden, aber es wird noch davon ausgegangen, dass diese jeweils einzelne, voneinander unabhängige Prozesse abbilden. Dies soll um das Konzept von Prozessketten erweitert werden, in denen mehrere Prozesse mit festgelegten Bearbeitungsreihenfolgen und Wartezeiten miteinander gekoppelt werden.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Das Verbundvorhaben baut auf den Ergebnissen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts „Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR; BMBF-gefördert; Förderkennzeichen: 02S9113A und 15S9113A; Laufzeit: 01/2014 bis 06/2022)“ auf. Ähnliche Vorhaben, deren Ergebnisse genutzt werden könnten, sind dem Projektteam nicht bekannt.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Vor dem Hintergrund des NukPlaRStoR-Projekts wurde am KIT eine Abschlussarbeit zum Thema „Projektmanagementsoftware und Scheduling: Aktuelle Bestandsaufnahme von Funktionalitäten und Identifikation von Potenzialen“ ausgeschrieben und betreut. Im Berichtszeitraum wurde darauf aufbauend ein gleichnamiger Forschungsbericht verfasst und veröffentlicht (<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000138068>). Die gewonnenen Erkenntnisse helfen bei der Abgrenzung des NukPlaRStoR-Planungswerkzeugs gegenüber existierender Projektmanagementsoftware. So wurde beispielsweise herausgearbeitet, dass der zur Stoffstromplanung erforderliche kumulative Ressourcentyp (vgl. AP 7.4) in etablierter Projektmanagementsoftware nicht zur Verfügung steht und somit eine wesentliche Neuerung darstellt.

Das KIT stellte zudem den Projektfortschritt im Rahmen eines Plenarvortrags und einer schriftlichen Vortragsvollversion bei der diesjährigen KONTEC-Konferenz (25. bis 27. August 2021) vor. Die dabei demonstrierten Funktionalitäten des entwickelten Planungswerkzeugs stießen auf großes Interesse. Daneben stellte das KIT die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Stoffstromplanung an den Konferenzen IFORS 2021 (23. bis 27. August 2021) und OR 2021 (31. August bis 03. September 2021) vor. Für Letztere wurde ein Beitrag zum Konferenzband verfasst, welcher sich im Review-Prozess befindet. Eine wissenschaftliche Publikation befindet sich weiterhin beim European Journal of Operational Research im Review-Prozess.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9414B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RODIAS GmbH (ehem. GiS Gesellschaft für integrierte Systemplanung mbH)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) – Teilvorhaben: Benutzeroberfläche und Schnittstellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.07.2019 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 205.681,04 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Oliver Wagner	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Oliver.wagner@rodias.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen rückt sowohl national als auch international in den Fokus der Energie- und Rückbauwirtschaft. Bereits abgeschlossene und noch laufende kerntechnische Rückbauprojekte weisen auch aufgrund von unzureichender Planung teilweise extreme Zeit- und Kostenabweichungen von der ursprünglichen Planung auf. Daher ist es das Ziel des Verbundvorhabens NukPlaRStoR, ein Planungswerkzeug zu entwickeln, das speziell auf die Bedürfnisse kerntechnischer Rückbauprojekte abgestimmt ist und die Planung wesentlich vereinfacht. Hierbei sollen alle wesentlichen Anforderungen zur kerntechnischen Rückbauplanung berücksichtigt und mit Hilfe mathematischer Methoden ein optimierender Planungsansatz entwickelt und implementiert werden.

Durch das zu entwickelnde Planungswerkzeug wird ein möglichst optimaler Plan (hinsichtlich der Kosten und unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen) berechnet, der alle auszuführenden Arbeiten sowie alle während des Rückbaus anfallenden Stoffströme enthält. Ausgehend von den Stoffströmen wird mit Hilfe des Planungswerkzeugs eine logistische Planung (z.B. Transport und Bearbeitung innerhalb der Anlage, inkl. Konditionierung) sowie eine Behälterplanung inkl. Endlagerdokumentation ermöglicht. Des Weiteren soll das zu entwickelnde Planungswerkzeug mit anderen Programmen (bspw. REVK zur Reststoffverfolgung, Microsoft Project oder Oracle Primavera P6 EPPM zur Projektplanung) gekoppelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten im Verbundvorhaben besteht in der Entwicklung einer benutzerfreundlichen Oberfläche des Planungswerkzeugs.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt untergliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP): Zunächst werden Daten aus bereits durchgeführten kerntechnischen und konventionellen Rückbauprojekten gesammelt und aufbereitet (AP 1). Mit Hilfe dieser Daten wird das Planungswerkzeug des abgeschlossenen Verbundvorhabens MogaMaR (Förderkennzeichen: 02S9113A und 15S9113A) getestet, um dessen Praxistauglichkeit nachzuweisen (AP 2). Nachdem der Nachweis erbracht wurde, werden Weiterentwicklungen dieses Planungswerkzeugs vorgenommen, die jeweils mit den Daten getestet und validiert werden. Hierzu wird zunächst eine benutzerfreundliche Nutzeroberfläche erstellt (AP 3), welche die Bedienung des Planungswerkzeugs ohne große Vorkenntnisse ermöglicht und Fehler bei der Verwendung verhindert. Das Planungswerkzeug wird mit Software gekoppelt, welche typischerweise beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt wird, allerdings den Plan nicht optimiert (AP 4). Dazu werden Schnittstellen zwischen dem Planungswerkzeug und solcher Software geschaffen. Je Vorgang wird bestimmt, welche und wie

viele Stoffe zeitlich definiert bei dessen Ausführung anfallen (AP 5). Im Zuge der Abbildung von Stoffströmen im Planungswerkzeug wird eine logistische Planung zum Umgang mit den Stoffströmen entwickelt und implementiert. Dies umfasst eine Reststoff- und Abfallplanung und die dafür benötigten Produktkontrollmaßnahmen (AP 6.1), die Planung von Logistik und Transport, Behandlung und Konditionierung (AP 6.2), eine Behälterplanung (AP 6.3) und die Erstellung einer Endlagerdokumentation (AP 6.4). Außerdem wird das Planungswerkzeug um weitere Funktionen, wie zu berücksichtigende alternative Ausführungsmöglichkeiten (sog. Multi-Mode-Fall) (AP 7.1), die Orte der Vorgangsausführung (AP 7.2) sowie die Berücksichtigung von Verbrauchsressourcen (AP 7.3) und Pufferlagern (AP 7.4) erweitert.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die RODIAS hat im Betrachtungszeitraum das AP4 (Entwicklung und Implementierung eines Adaptermodells zur Abbildung konkreter Schnittstellen) erfolgreich abschließen können. Es wurden drei Standardadapter (Schnittstellen) für Oracle Primavera P6, MS-Project und MS Excel entwickelt und getestet und stehen nun Anwendern zur Verfügung.

Im Rahmen des AP 5 wurde die Integration des KIT-Softwarecodes zur „Weiterentwicklung und vollständigen Berücksichtigung von Stoffströmen“ in der Projektplanung incl. der notwendigen Anpassungen an der Benutzeroberfläche vollständig umgesetzt.

Im Rahmen des AP 7.1 wurde der „Multi-Mode-Fall“ umgesetzt. Im Rahmen des AP 7.3 wurde die Integration „nicht-erneuerbarer“ Ressourcen vollständig umgesetzt. Im Rahmen des AP 7.4 wurde die Integration von „kumulativen Ressourcen“ vollständig umgesetzt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Integration des AP 6 (Logistische Planung) nach Fertigstellung der wissenschaftlichen Vorarbeiten.

Zudem müssen folgende durch das KIT im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit durchgeführte Erweiterungen des Planungswerkzeugs in OPTIRA abgebildet werden, die bislang zwar berechnet werden, aber noch nicht in der Benutzeroberfläche abgebildet sind:

- Zeitbeziehungen zwischen Vorgängen
- Kostenoptimierung bei vorgegebener Projektlaufzeit
- Präferierte Startzeiten
- Bikriterielle Optimierung

Weiterhin wird basierend auf dem Planungswerkzeug des KIT durch eine Kopplung desselben eine Multiprojektoptimierung, also eine Optimierung unter Einbeziehung mehrerer (Teil-)Projekte mit projektübergreifenden Ressourcen, in der Benutzeroberfläche umgesetzt.

Konkrete Tätigkeiten zum AP 7.2 (Orte der Vorgangsausführung inkl. Expositionszeiten) stehen noch aus, werden aber in den wissenschaftlichen Arbeiten des KIT bereits konzeptionell bearbeitet.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Das Verbundvorhaben baut auf den Ergebnissen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts „Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR; BMBF-gefördert; Förderkennzeichen: 02S9113A

und 15S9113A; Laufzeit: 01/2014 bis 06/2022)“ auf. Ähnliche Vorhaben, deren Ergebnisse genutzt werden könnten, sind dem Projektteam nicht bekannt.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Die RODIAS hat das aus dem im Verbundvorhaben entwickelten Planungswerkzeug in 2021 vom KIT lizenziert und das daraus hervorgegangene Softwareprodukt „OPTIRA“ in 2021 Im Rahmen der im Folgenden genannten anwendernahen Fachkonferenzen vorgestellt:

- Maintenance OnlineDays (18.-20.05.2021 virtuell)
- KONTEC 2021 (25.-27.08.21 Dresden)
- 5. Jahrestagung Rückbau (27.-28.09.21 Berlin)
- CAPEX 2021 (05.-06.10.21 Berlin)
- ICOND 2021 (19.10.-21.10.21 Aachen)

Das Forschungsprojekt NukPlaRStoR hat zudem im Rahmen des 9. KIT-Innovationswettbewerbs NEULAND am 30.06.21 in Karlsruhe den 3. Platz in der Kategorie Transferpreis errungen.

Am 29.09.2021 wurde im Rahmen eines BLOG-Beitrags ein Interview mit den Projektpartnern RODIAS und KIT zum Thema „Projektplanung mit Mehrwert“ veröffentlicht:

<https://www.kit-technology.de/de/blog/projektplanung-mit-mehrwert> .

Eine wissenschaftliche Publikation durch den Projektpartner KIT ist in Vorbereitung bzw. wurde bereits beim European Journal of Operational Research eingereicht und befindet sich dort im Review-Prozess.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.01.2022	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9419
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fachhochschule Südwestfalen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> KernTrafo - Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2020 bis 28.02.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.531.556,82€
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Ralf Lanwehr	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> lanwehr.ralf@fh-swf.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

KernTrafo konzentriert sich auf drei Kern-Herausforderungen des Rückbaus von Kernkraftwerken: Die geringe Motivation der Mitarbeiter:innen, grundlegende Veränderungen der Anforderungen und ein gleichbleibender Personalstamm. KernTrafo adressiert diese Themen in der Projektkomponente 1 (PK1) durch einen innovativen Abgleich der vorhandenen Fähigkeiten der Mitarbeiter:innen mit neu auftretenden Anforderungen, in PK2 durch Führungskräfteentwicklung zur Bewältigung der Demotivation und in PK3 durch eine die Belegschaft einbindende Neuzusammenstellung von Aufgaben in den verschiedenen Phasen des Rückbaus. In PK1 wird Machine Learning verwendet, um Kompetenzcluster aus unstrukturierten Daten (interne Datenbanken) zu identifizieren, die beschreiben, welche Kompetenzen derzeit im Demontageprozess notwendig sind. So kann in verschiedenen Projektphasen festgestellt werden, welche Kompetenzen entscheidend zum Rückbau beitragen und gegebenenfalls erweitert werden müssen. In PK2 werden Führungskräfte in einem innovativen Führungsstil geschult – Paradoxe Führung. Der Kern paradoxer Führung ist der Umgang mit Spannungen zwischen gegensätzlichen, aber ebenso erstrebenswerten Zielen wie Innovation versus Effizienz. Im Mittelpunkt steht dabei der sinnvolle Umgang mit Spannungen: Der Rückbau von Kernkraftwerken erfordert die Erkundung neuer Welten, ohne sicherheitsrelevante Aspekte der alten zu vernachlässigen. In PK3 werden Mitarbeiter:innen und Führungskräfte in Job Crafting trainiert. Die Mitarbeiter:innen re-designen ihre Arbeit, um die Anpassung an ihre Bedürfnisse, Präferenzen und Fähigkeiten zu erhöhen. Dieser mitarbeitergetriebene Veränderungsansatz erhöht die Veränderungsbereitschaft und die Motivation für den Rückbau der Kernkraftwerke. Der Einsatz dieser innovativen und dynamischen Personalführungsinstrumente wird erprobt und die Anwendbarkeit für den besonderen Kontext des sicherheitssensiblen, neuartigen und sich ändernden Rückbaus von Kernkraftwerken getestet.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### K1 besteht aus drei Hauptphasen:

1. Erzeugung einer nutzbaren Datenbasis
2. Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation sinnvoller und für den Rückbau relevanter Kompetenzcluster
3. Überführung des Algorithmus in einen Prototypen

### PK2 besteht aus drei Hauptphasen:

1. Evaluation der aktuellen Führungskultur
2. Entwicklung und Pilotierung eines Trainingskonzeptes für paradoxe Führung und Schulung der Führungskräfte in paradoxer Führung

3. Evaluation der Trainingsergebnisse und Vergleich zum in Phase 1 erhobenen Status Quo  
PK3 besteht aus einer Hauptphase:

1. Entwicklung und Durchführung eines Job Crafting-Konzepts für Mitarbeiter:innen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

#### Meilensteinplanung: Administration

Die im Zwischenbericht für die erste Jahreshälfte 2021 angekündigten Unterlagen, die Geheimhaltungsvereinbarung, der Zusammenarbeitsvertrag und das Datenschutzkonzept wurden in der zweiten Jahreshälfte fertiggestellt und unterzeichnet. Damit steht das Projekt nun auf einer soliden vertraglichen Grundlage.

Die zweite Jahreshälfte 2021 war geprägt von einem internen Wechsel der Verantwortlichkeiten auf Seiten der RWE Nuclear. In diesem Zusammenhang wurde die Leitung des Transformationsprozesses für sämtliche Rückbauprojekte der RWE Nuclear im Herbst 2021 an Christoph Schlechter übertragen. Er bildete ein neues Transformationsteam, das im weiteren Projektverlauf zentraler Ansprechpartner für das KernTrafo Projekt sein wird. Am 22. Oktober 2021 gab es ein erstes Online-Kennenlerngespräch, auf das am 05. November 2021 ein persönliches Projekt-Meeting in der Zentrale in Essen folgte. Ziel des Termins war der Austausch über Inhalte und Ziele des Forschungsprojekts KernTrafo und der Projekte des RWE-Transformationsteams sowie die Koordination weiterer gemeinsamer Aktivitäten. Dabei konnten große inhaltliche Übereinstimmungen festgestellt werden.

#### Komponente 1: KI-basierte Kompetenzmodellierung

Wie geplant, wurde die Skill-Software im Kernkraftwerk Gundremmingen (KKW-G) eingesetzt, um die mit der Einleitung des Rückbauprozesses verbundene Personalplanung zu unterstützen. Die Software erlaubt es den Datenbestand des Personals bei RWE zu erfassen, zu modellieren und Kompetenzmodellierung mittels Datenvisualisierung zu ermöglichen. Darüber hinaus konnten Stellenprofile seitens RWE eingepflegt und abgeglichen werden mit dem Ziel, ein Person-to-Job-fit zu realisieren: Welche Person ist für welche Aufgabe am geeignetsten?

Sowohl die Kraftwerksleitung als auch die Personalabteilung des KKW-G bewerten die Einführung als erfolgreich. Abweichend von der Planung wurde die Software auf Wunsch der Verantwortlichen des KKW-G nicht im Rahmen von Workshops eingeführt. Stattdessen stellte Thomas Kopinski ein Einführungsvideo zur Verfügung, in dem er den Nutzen der Software erläuterte. In der Folge hatten die Mitarbeitenden des KKW-G die Möglichkeit die Software auf freiwilliger Basis zu nutzen. Nach einer kurzen Optimierungsphase konnte durch die Software valide Job-Vorschläge generiert werden.

#### Komponente 2: Paradoxe Führungsstile

##### *Erhebung Führungskultur (Pre-Testung)*

Die vom KernTrafo-Team entwickelte Diagnostik zur Führungskräfte-Kultur (Selbst- und Fremdbild) wurde dem Betriebsrat des Standortes Biblis vorgestellt. Dieser hat der Durchführung zugestimmt. Die Befragung wurde im September 2021 durchgeführt und ab Oktober seitens KernTrafo ausgewertet.

Das Management der RWE Nuclear und des Kernkraftwerks Biblis erhielt am 28.10.2021 eine aggregierte Analyse der Führungskultur am Standort Biblis. Insgesamt haben 24 von 26 Führungskräfte und 47 % aller Mitarbeitenden (=285) des Standorts Biblis an der Befragung teilgenommen. 24 Führungskräfte erhalten damit eine Selbsteinschätzung. Unter Beachtung der Anonymitätsgrenze von mind. fünf Antworten pro Führungskraft konnten insgesamt elf Fremdbilder für die 26 teilnehmenden Führungskräfte erstellt werden.

### *Trainings Paradoxe Führung*

Die Führungskräfte-Module “Flexibilisierende Führung” und “Persönlichkeit” wurden wie geplant konzipiert. Aufgrund der veränderten Verantwortlichkeiten und der daraus entstehenden Notwendigkeit, das interne Transformationsprogramm der RWE Nuclear und die Aktivitäten im Forschungsprojekt KernTrafo auch zeitlich aufeinander abzustimmen, wurde die Durchführung vorerst verschoben.

Das gesamte Konzept der Projektkomponente “Paradoxe Führung” wurde dem neuen Projektteam am 05.11.2021 vorgestellt. Die neuen Verantwortlichen sind sehr interessiert daran, die Trainings durchzuführen. Da sich das interne Transformationsprogramm aktuell noch in der Startphase befindet, wird die Terminfindung voraussichtlich bis Mitte 2022 erfolgen.

### *Train-the-Trainer*

Das im Projektantrag definierte Train-the-Trainer-Konzept wurden ebenfalls dem neuen Projektteam vorgestellt. Das Train-the-Trainer-Konzept wurde von der RWE Nuclear positiv aufgenommen, da das im Forschungsprojekt gewonnene Wissen nachhaltig zur Verfügung gestellt wird.

Das Train-the-Trainer-Programm besteht aus drei Schritten:

1. Die Trainer:innen erhalten vorab eine theoretische Einführung in Inhalte und Ablauf des Trainings.
2. Sie werden an sämtlichen Trainings teilnehmen und können in den Modulen bereits erste eigene Trainingserfahrung als Co-Trainer:innen sammeln.
3. Das KernTrafo Team der FH-SWF stellt zur Unterstützung der RWE internen Trainer:innen jeweils einen Trainerleitfaden sowie umfangreiche Schulungsmaterialien zur Verfügung.

Das Transformationsteam hat das interne Trainerteam der RWE Nuclear bereits mit in das Projekt einbezogen. Die Trainingsinhalte und das weitere Vorgehen wurde bereits abgestimmt. Die Terminfindung erfolgt mit der Planung der Trainingstermine (s.o.).

### Komponente 3: Job Crafting

Bereits im ersten Halbjahr 2021 war die Konzeption des Job-Crafting-Workshops abgeschlossen. Im zweiten Halbjahr fand die theoretische Einführung in Inhalte und Ablauf des Trainings für interne Trainer der RWE Nuclear statt. An dieser Einführung nahmen der damalige Projektverantwortliche und zwei interne Trainer (Standorte Gündremmingen und Zentrale Essen) teil.

Aufgrund der veränderten Verantwortlichkeiten und der daraus entstehenden Notwendigkeit, das interne Transformationsprogramm der RWE Nuclear und die Aktivitäten im Forschungsprojekt Kerntrafo auch zeitlich aufeinander abzustimmen, wurde auch die Durchführung der Komponente Job Crafting vorerst verschoben. Die Inhalte der Job Crafting Workshops wurden dem neuen Transformationsteam (RWE) am 26.11.2021 vorgestellt. Dieses begrüßt die Job Crafting Komponente.

## **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

### Komponente 1:

Nach der erfolgreichen Softwareeinführung im KKW-G wird das Kernkraftwerk Biblis als nächster Standort avisiert. Hier verändert sich die Problemstellung weg von einer einmaligen Zuordnung von Personen auf vorgegebene Positionen hin zu einem flexiblen Tool, das Mitarbeitende zu regelmäßig neu eingepflegten Projekten zuordnen soll.

Auch wenn es nicht im Fokus des Projekts KernTrafo liegt, wurde die Software inzwischen auch vom Bereich Braunkohle angefragt. Die dortigen Verantwortlichen werden in den kommenden

Wochen von den Verantwortlichen des Standortes Gundremmingen über ihre Erfahrungen mit der Skill-Software informiert.

Für die Entwicklung eines Modells wird das KernTrafo Team verschiedene Modelle in einer „Sandbox“-Umgebung trainieren und testen. Der modulare Aufbau dieser Entwicklungsumgebung ermöglicht ein schnelles Wechseln einzelner Komponenten und beschleunigt das Testen von neuen Modellierungsmethoden. Diese Herangehensweise eignet sich besonders zum Erstellen interaktiver Prototypen mit schneller Umsetzbarkeit.

Das Hauptziel ist der Aufbau eines Systems, das:

- die Berechnungs- und Umsetzdauer für neue Tests reduziert,
- fehlertolerant und selbstlernend ist (Continuous Learning),
- effiziente Berechnungen im Hinblick auf das Workload-Management bietet und
- Batch- und Echtzeitverarbeitung unterstützt.

### Komponente 2:

#### *Erhebung Führungskultur (Pre-Testung)*

Das KernTrafo Team wird die aggregierten Ergebnisse am 15.2.2022 gemeinsam mit dem Transformationsteam der RWE Nuclear dem Managementteam des Standortes Biblis präsentieren. Nach der Ergebnisdarstellung wird eine offene Diskussion erfolgen, in der dem Managementteam Biblis die Möglichkeit gegeben wird, Fragen zu den Ergebnissen zu stellen.

Die Ergebnisse der Einzelfeedbacks (Selbst- und Fremdbild) werden im Rahmen der anstehenden Führungskräfte Trainings ausgegeben und aufgearbeitet.

#### *Trainings Paradoxe Führung*

Durch den Wechsel der Ansprechpartner seitens RWE ist die organisatorische Planung der zwei Module „Flexibilisierende Führung“ und „Persönlichkeit“ aus PK2 noch in Arbeit. Zur Durchführung des Moduls „Persönlichkeit“ ist eine Big 5 Testung notwendig. Diese wird im Gesamtbetriebsrat der RWE Nuclear beantragt werden. Jedes Modul hat einen Umfang von zwei Tagen und wird am Standort Biblis zweimal durchgeführt.

Das Modul „Charisma“ soll, entsprechend der Projektplanung, als letztes Modul standortübergreifend durchgeführt werden. Die Inhalte dieses Moduls basieren auf den Ergebnissen einer Serie von Laborexperimenten, die aktuell durchgeführt werden. Untersuchungsgegenstand dieser Studie ist die Fragestellung nach der Mediation von Charisma auf Performance.

#### *Train-the-Trainer*

Das Train-the-Trainer-Programm wird durchgeführt, sobald die Planung der Trainingstermine abgeschlossen ist (s.o.).

### Komponente 3:

Zurzeit laufen die Abstimmungen für die organisatorische und inhaltliche Planung für die Projektkomponente Job Crafting.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

### Data-Science: Präsentation Skill Komponente auf der SIGIR-Konferenz

Die Veröffentlichung eines Papers auf der SIGIR-Konferenz ist geplant. Inhaltlich beschäftigt sich das Paper mit der Empfehlung von geeigneten Stellen an Personen. Die Empfehlung basiert stets auf der aktuellen Stellenbeschreibung der jeweiligen Personen. Der Fokus liegt auf der Untersuchung des Profils von Personen unter Verwendung verschiedener neuronaler Netzwerkmodelle, darunter TextCNN, CNN-LST, TextRNN, TextBiRNN und RCNN mit verschiedenen vortrainierten Wortembeddings im Datensatz. Es wurde ein einfaches und effektives Ensemble-Modell vorgeschlagen, das verschiedene neuronale Netzwerkmodelle kombiniert. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das vorgeschlagene Ensemble-Modell eine Genauigkeit von 89 % für 89 Klassen hatte, was eine Neuheit bei der Textklassifizierung auf Grundlage von deutschem Text ist. Darüber hinaus werden diese experimentellen Ergebnisse analysiert, um ein Verständnis für das Problem zu erhalten und in Zukunft bessere Lösungen zu finden. Der in der Studie verwendete Datensatz besteht aus 350.000 verschiedenen Stellenbeschreibungen, die von Online-Karriereportalen in Kernkraftwerken gesammelt wurden. Es wurden Daten mit 89 verschiedenen Arten verwandter Jobs kategorisiert. Diese Kategorien beziehen sich hauptsächlich auf Rollen, die typischerweise in der heutigen datengesteuerten Wirtschaft zu finden sind.

### Paradoxe Führung: Artikel zum Aspekt Charisma

Aktuell befindet sich eine Serie von drei Laborexperimenten in Arbeit. Das Ziel ist es, Mediatoren von Charisma auf Follower-Performance zu identifizieren. Theoriebasiert konnten zwei potenzielle Mediatoren (Wert der Mission der Führungskraft und Selbstwirksamkeitswahrnehmung der Mitarbeitenden) identifiziert werden. Mit Hilfe eines sog. "blockage designs" werden die Mediatoren experimentell getestet.

Hierfür erfolgten bisher folgende Aktivitäten:

- Literaturanalyse
- Videodreh, jeweils für die neutrale bzw. Charisma Bedingung
- Durchführung von objektiven und subjektiven Manipulation Checks der Reden
- Auswahl geeigneter Aufgaben
- Durchführung eines Manipulation Checks für die Aufgaben
- Durchführung einer Pilotstudie Charisma -> Leistung zum Festlegen der Basiswerte für die Mediatoren

Da einige der Studien wiederholt werden müssen, wird der Artikel vermutlich bis Mai 2022 als Registered Report im Journal "The Leadership Quarterly" eingereicht.

### Paradoxe Führung: Präsentation Charisma-Forschung auf der GDP-Konferenz

Außerdem wurde ein Poster-Beitrag über die o.g. Charisma-Experimente für den 52. DGP-Kongress in Hildesheim eingereicht. Auf dem Poster wird das methodische Vorgehen der Charisma-Experimente geschildert und ggfs. erste Ergebnisse vorgestellt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9426A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Ruhr-Universität Bochum – Fakultät für Psychologie	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Rückbaukompetenzen)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 722.252,15 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Annette Kluge	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:Annette.kluge@ruhr-uni-bochum.de">Annette.kluge@ruhr-uni-bochum.de</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist ein kontinuierlicher und den ganzen Standort umfassender Veränderungsprozess und dadurch gekennzeichnet, dass sich neben der Anlage auch die Anlagenorganisation in einem ständigen Wandel befindet. Die dadurch bedingte erforderliche Veränderung von Organisations- und Arbeitsprozessen führt aus arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive zu veränderten und erhöhten Anforderungen an die Kompetenzen der Mitarbeiter/innen sowie der Führungskräfte. Das Projekt der Verbundpartner/innen der Ruhr-Universität Bochum (RUB), der Gesellschaft für Simulatorschulung (GfS) und PreussenElektra (PEL) hat das Ziel, diese veränderten Rollen in den Rückbauphasen durch Trainingsmaßnahmen, basierend auf einer wissenschaftlichen Vorgehensweise zur Trainingsentwicklung, zielgruppenorientiert zu entwickeln und zu unterstützen. Dieses übergeordnete Ziel lässt sich weiter in Forschungs- und umsetzungsbezogene Ziele untergliedern. Das Forschungsziel beinhaltet die Erfassung der genauen Bedarfe an Trainingszielen und -methoden für die hier vorliegende Form organisationaler Veränderung und im Hinblick auf Rollenveränderungen in Bezug auf Strahlenschutz-, Brandschutz-, Arbeitsschutz- und Rückbauzielen sowie den gleichzeitigen Aufbau der dafür benötigten Kompetenzen. Die auf dieser Grundlage entwickelten Maßnahmen sollen dann das Ziel unterstützen, den Rückbau sicherer und effizienter zu gestalten und das Betriebspersonal für die Herausforderungen des Strahlenschutzes, der Arbeitssicherheit sowie der Unfallverhütung generell zu sensibilisieren, sowie effizienz- und projektorientiertes Denken bei schnelleren und flexibleren Entscheidungswegen bei geringerer Regelungstiefe zu fördern. Die umsetzungsbezogenen Ziele umfassen die Implementierung von wissenschaftlich entwickelten und evaluierten Trainingsangeboten für das am Rückbau beteiligte Personal der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte der Unternehmen (Betreiber und Fremdfirmen). Dabei sollen im Hinblick auf die antizipierten Entwicklungen der Digitalisierung in der Trainingswissenschaft und damit der zukünftigen Veränderungen von Trainingsmethoden die seminar-basierten Trainingsangebote um übungs- und erfahrungsbasierte Trainingsmethoden mit multimodalen Mixed Reality Anwendungen ergänzt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Um der Vielseitigkeit des Themas (Nachbetrieb & Stilllegung, Abbau, Öffentlichkeitseinbindung, etc.) und dem Zusammenspiel der am Rückbau beteiligten internen Organisationseinheiten und externen Organisationen und Subunternehmen Rechnung zu tragen, gliedert sich das Vorhaben in vier Phasen:

- 1) Soll-/ Ist-Analyse
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung
- 3) Maßnahmendurchführung
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit

Diese vier Phasen lassen sich weiter in 11 Arbeitspakete (AP) untergliedern:

- 1) Soll-/ Ist-Analyse:
  - AP1: Interviews mit ca. 20 Führungskräften von PEL mit Rückbauerfahrung (Thema: Veränderung der Rolle von Führungskräften und allgemeine Mensch-Technik-Organisation Aspekte)
  - AP2: Interviews mit 20-30 Mitarbeiter/innen sowie der Personalvertretung von PEL, die den Transitionsprozess erlebt haben (Thema: Veränderung der Mitarbeiter/innen-Rolle und allgemeine Mensch-Technik-Organisation Aspekte)
  - AP3: Auswertung schriftlicher Dokumente (Unfallberichte, Incident Alerts) aus dem Bereich Arbeitsschutz von PEL sowie meldepflichtige Ereignisse
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung
  - AP4: Ableitung von Trainingszielen und -szenarien in Bezug auf Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte für die unterschiedlichen Rückbauphasen
  - AP5: Operationalisierung der Trainingsziele und erste Skizzierung der technischen und nicht-technischen Anforderungen an die digitalen Lernumgebungen
  - AP6: Auswahl und Festlegung von Trainingsmethoden (Virtual Reality via Head Mounted Display, Tablet-basiert oder Monitordarstellung) und Trainingsmedien sowie Ausarbeitung der Trainingsunterlagen.
  - AP7: Entwicklung der Trainingsdrehbücher und Implementierung der Lernumgebungen in Form multimodaler Anwendungen und Microlearning-Einheiten sowie Pretest der Trainingseinheiten für die Mitarbeiter/innen und Führungskräfte
- 3) Maßnahmendurchführung
  - AP8: Pilotdurchführung der entwickelten seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Mitarbeiter/innen der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung
  - AP9: Pilotdurchführung der seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Führungskräfte der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit
  - AP10: Die in AP 8 und 9 durchgeführten Trainings werden formativ und summativ zu verschiedenen Zeitpunkten während des Trainings und nach dem Training mit Bezug zu den Trainingszielen (AP 4 und 5) evaluiert
  - AP11: Verbreitung der Ergebnisse auf Konferenzen und Kongressen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Im Berichtszeitraum wurde Projektphase 1) Soll-/ Ist-Analyse weitergeführt. AP1 und 2 wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Insgesamt wurden 26 Führungskräfte und 24 Mitarbeitende interviewt. Auf Grund der COVID-19 bedingten pandemischen Lage wurden die Interviews virtuell durchgeführt. Ein Interview dauerte ca. zwischen 60 und 150 Minuten. Die Audioaufzeichnung wurde im Anschluss transkribiert. Die Transkription der Interviews startete ebenfalls im Berichtszeitraum. Zu 17 Interviews liegen bereits schriftliche Volltranskripte vor. In Abhängigkeit von der Interviewdauer umfasst ein Transkript zwischen 15 und 30 Seiten (ca. 10.000 – 17.000 Wörter).

Parallel zu AP 1 und 2 wurde mit den APs 4-6 begonnen. Hierzu haben sich die ProjektpartnerInnen der RUB sowie der GfS drei Mal getroffen (in Persona und virtuell). Im Rahmen der Treffen wurde ein erstes Trainingskonzept zum Thema Kommunikation entwickelt.

Der Steuerungskreis (bestehend aus Vertreter/Innen der RUB, der GfS und der PEL) hat sich im Berichtszeitraum i.S. eines Jour Fixe drei Mal virtuell und einmal persönlich (im Kraftwerk Unterweser mit anschließender Besichtigung) über laufende sowie zukünftige Aktivitäten abgestimmt. Darüber hinaus fanden 12 bilaterale Gespräche zwischen der RUB und PEL statt.

Um weitere praktische Einblicke in den Rückbau zu erhalten hat Frau Myriel Kinkel im August 2021 das Kernkraftwerk Isar besucht. Schwerpunkt des Besuchs war das Thema Dekontstrahlung. Zudem hat Frau Kinkel vom 24.-27.08.2021 an der KONTEC in Dresden teilgenommen.

Darüber hinaus wurde im Berichtszeitraum ein Mixed-reality basierter Demonstrator für ein Treppensturz-Lernszenario entwickelt sowie ein 3D Modell eines Heizungsmoduls ausgearbeitet und ein Lernszenario für das Dekontstrahlen erstellt (AP6).

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Weiterarbeit orientiert sich an oben dargelegtem Arbeitsprogramm. Im kommenden Berichtszeitraum (01/22 – 06/22) werden APs 4-6 abgeschlossen und AP7 durchgeführt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Frau Lisa Thomaschewski hat das Projekt sowie erste Ergebnisse am 23.09.2021 auf der 12. Fachgruppentagung AOW-Psychologie und Ingenieurpsychologie sowie am 12.11.2021 im Rahmen des interdisziplinären Forschungssymposium für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (safeND) des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) vorgestellt.

Darüber hinaus haben Frau Prof. Dr. Annette Kluge und Frau Thomaschewski vom 29.11.-03.12.2021 am Technical Meeting on Advancing Human Resource Development and Competence Building for Decommissioning der IAEA in Piacenza, Italien, teilgenommen.

Zusätzlich wurde ein Bericht über die Begehung des Kernkraftwerks Unterweser im Newsletter des Lehrstuhls AOW-Psychologie der RUB veröffentlicht.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9426B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Gesellschaft für Simulatorschulung mbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 19.315,26 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Michael Aman	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.aman@ksg-gfs.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Es werden Schulungs- und Trainingseinheiten für die beiden Zielgruppen (Führungskräfte und Mitarbeiter/innen) in Form von Microlearning-Lerneinheiten im quelloffenen Kursmanagementsystem Moodle für die geplanten Management Level und betriebsfertige, kompilierte Mixed Reality Lerneinheiten für Mitarbeiter/innen aus dem operativen Umfeld mit verschiedenen Qualifikationen bereitgestellt.

Die im Projekt erarbeiteten Quelldateien dienen im Folgenden als Basis für Customizing wie standortspezifische Anpassungen und Internationalisierung. Dazu passend werden Handlungsempfehlungen für die Einrichtung der Mixed Reality Hard- und Software und das gewünschte Customizing erstellt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Um dem vielschichtigen Vorhaben (Nachbetrieb & Stilllegung, Abbau, Öffentlichkeitseinbindung etc.) und dem Zusammenspiel der am Rückbau beteiligten internen Organisationseinheiten und externen Organisationen/Unternehmen Rechnung zu tragen, gliedert es sich in 4 Phasen:

- 1) Soll-/Ist-Analyse: Arbeitspakete (AP) 1-3
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung: AP 4-7
- 3) Maßnahmendurchführung: AP 8+9
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit: AP 10+11

Die 4 Phasen gliedern sich in 11 Arbeitspakete.

AP 1: Interviews mit ca. 20 Führungskräften von PreussenElektra mit Rückbauerfahrung.

AP 2: Interviews mit 20-30 Mitarbeiter/innen sowie der Personalvertretung von PreussenElektra, die diesen Transitionsprozess erlebt haben.

AP 3: Auswertung schriftlicher Dokumente wie Unfallberichte und „incident alerts“ (ca. 10-15 pro Jahr) sowie weiterer Berichte (Arbeitsschutz PreussenElektra/meldepflichtige Ereignisse).

AP 4: Ableitung von Trainingszielen und -szenarien in Bezug auf Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte für die unterschiedlichen Rückbauphasen.

AP 5: Operationalisierung der Trainingsziele, die ebenso relevant sind für die Ableitung von formativen und summativen Evaluationsinstrumenten.

AP 6: Festlegung von Trainingsmethoden/Trainingsmedien (Virtual Reality Darstellung mit Datenbrille, Tablet-basierter oder Monitordarstellung) sowie Ausarbeitung der Trainingsunterlagen (Ziele s. AP 4).

AP 7: Entwicklung d. Trainingsdrehbücher und Implementierung der Lernumgebungen in Form der multimodalen Anwendung und der Microlearning-Einheiten sowie Pretest.

AP 8: Pilotdurchführung: Seminar-basierte Trainingsmaßnahmen Mitarbeiter PEL, ergänzt d. multimodale Mixed Reality Anwendungen (10x2 Tage) Trainings mit jeweils 12 Teilnehmer/innen) inkl. Microlearning-Module zur Transfersicherung.

AP 9: Pilotdurchführung (4x 2 Tage) Führungskräfte PEL.

AP 10: Evaluation der in AP 8 und 9 durchgeführten Trainings.

AP 11: Verbreitung der Ergebnisse auf Konferenzen und Kongressen.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Berichtszeitraum wurde die Phase 1 weiterverfolgt (AP 1 bis AP 3)

AP 3 ist abgeschlossen.

AP 1 ist abgeschlossen.

AP 2 ist abgeschlossen.

Die Tätigkeit zu AP1 bis AP 3 wurden ausschließlich von den Projektpartnern durchgeführt.

Dabei war die GfS war nur beratend tätig.

Parallel zu AP 1/2 wurde mit AP 4-6 begonnen. Dazu gab es Treffen der Projektpartner, sowohl virtuell als auch persönlich. Aufgrund der anhaltenden Pandemie wurde jedoch weitgehend auf Präsenztreffen verzichtet. Beratung und Informationsaustausch fanden außer online einmal im KKU statt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die geplante Weiterarbeit umfasst die Fortführung der Phase 2 (AP 4-7) in welcher die Trainingsziele und die geeignetsten Trainings-Szenarien & -Methoden ermittelt werden. Geplant ist, diese Phase im Berichtszeitraum (01/22 – 06/22) abzuschließen.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Das Projekt hat Bezug zu den bereits vorhandenen Trainings im Bereich Human Factors und des Professionellen Handeln. In diesen Bereichen verbessern wir uns ständig und beschreiten neue Wege. Zu diesen Innovationen gehört auch das FORKA-Projekt.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Seitens der GfS sind noch keine Berichte und Veröffentlichungen erstellt worden.

Berichtszeitraum: 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9407A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200 733, 80007 München Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Standort Dresden-Klotzsche, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit. Teilprojekt A: Entwicklung, Erprobung und Bewertung neuer Konditionierungsverfahren mit Nuklidseparation zur Volumenreduktion	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.219.438,39 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Chem. H.–J. Friedrich	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine bestimmende Größe für die Bemessung der Endlagerkapazität für radioaktive Abfallstoffe ist die unterzubringende Menge an C-14-haltigem Reaktorgraphit, wobei die Bindungsform des Isotops C-14 im Graphit von großer Bedeutung ist. Die Zielstellung des Vorhabens besteht deshalb darin, eine neue Prozesskette moderner Dekontaminationsverfahren für die endlagergerechte Behandlung von radioaktivem Reaktorgraphit zu entwickeln und im Labor- bzw. Technikumsmaßstab zu erproben. Diese Technologie, bestehend aus den Teilschritten Charakterisierung, Oberflächendekontamination, Klassierung, Umsetzung des Graphits zu Synthesegas, Radionuklidabtrennung und Umsetzung zu endlagergerechtem Feststoffen, soll es künftig ermöglichen, den Reaktorgraphit durch weitgehende Separation der darin enthaltenen Radionuklide so zu konditionieren, dass die geplante Endlagerkapazität dafür hinreichend ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

- AP1: Projektkoordination
- AP2 Bereitstellung und Charakterisierung von Reaktorgraphit
- AP3 Ermittlung und Analyse der leichter freisetzbaren Nuklidfraktion und Auswahl von Verfahren zu deren Konditionierung
- AP4 Vergasung des vorbehandelten Graphits
- AP5 Dekontamination des erzeugten Synthesegases durch Isotopentrennung
- AP6 Umsetzung des mit C-14 angereicherten Gasstroms zu C-14-CaCO<sub>3</sub>
- AP7 Bilanzierungen, zusammenfassende Bewertung, Verwertungskonzept

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

AP1: Die Aktivitäten zu AP 1 erfolgten gemäß Bearbeitungsfortschritt. Am 27.07.2021 wurde das 5. Verbundmeeting durchgeführt.

AP2: Die Arbeiten zu AP 2 sind abgeschlossen.

AP3: Die Untersuchungen zur elektrochemischen Dekontamination von Reaktorgraphit aus dem Segment 3 der thermischen Säule des RFR wurden fortgesetzt. Aus den Versuchen zur elektrochemischen Desintegration des Reaktorgraphits wurden Teilchargen von zerkleinertem Material zurückgewonnen und für weitere Versuche zur elektrochemischen Vergasung aufbereitet.

AP4: Das Arbeitspaket wird durch den Verbundpartner TU-Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, bearbeitet.

AP5: Mit der fertig gestellten Membrandiffusionsanlage wurden einer Reihe von Versuchsreihen zur Trennung von Gasgemischen im Zuge der Auswahl und Charakterisierung potentiell geeigneter Membranen durchgeführt. Ein Trenneffekt ließ sich bislang für Gemische aus  $N_2/O_2$  nachweisen. Für eine wirkungsvolle Trennung von C-Isotopen am Beispiel von  $CO_2$  ist der beobachtete Trenneffekt bislang noch zu gering.

Die Arbeiten zur Trennung der C-Isotope mittels Thermodiffusion wurden abgeschlossen. In einer 20-stufigen Trennrohranlage ließ sich der C-14-Anteil eines  $CO_2$ -Modell-Gases mit erhöhtem C-14- $CO_2$ -Anteil um einen Faktor 230 verringern. Als Trennfaktor wurde ein Wert von 6,8 experimentell erhalten. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse kann abgeschätzt werden, dass für die Abtrennung von C-14 aus einem Gasvolumenstrom von  $1.000\text{ m}^3$  jährlich (1,98 t  $CO_2$  oder 0,54 t Kohlenstoff) ca. 1,3 Mio. Trennröhre der experimentellen Bauart benötigt würden.

Mit den Untersuchungen zum kinetischen Isotopeneffekt bei der elektrochemischen Reduktion von  $CO_2$  wurde begonnen. Es konnte zunächst gezeigt werden, dass die Reduktion von Natriumhydrogencarbonatlösungen an speziellen Kathoden auch mit der Bildung von Kohlenwasserstoffverbindungen verbunden ist

AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

AP7: Zu diesem AP wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP1: Das nächste Verbundmeeting ist für das II.Quartal 2022 als Präsenzmeeting geplant.

AP2: Die Bearbeitung ist abgeschlossen.

AP3: Mit Rückständen aus der elektrochemischen Dekontamination von Reaktorgraphit aus dem Segment 3 des RFR werden weitere Versuche zur elektrochemischen Vergasung und weitergehenden Dekontamination durchgeführt.

AP4: Geplant sind Abstimmungen mit dem Verbundpartner zu den konkreten Bearbeitungsschritten.

AP5: Die Untersuchungen zur Isotopenanreicherung werden mit C-14 fortgesetzt.

AP6: Die Bearbeitung ist erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.

AP7: Die Bewertungen bzgl. der einzusetzenden Verfahren und der anzuwendenden Prozessschritte wird fortgesetzt.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Bei der Planung des Projektes wurden die Ergebnisse der Projekte CAST, CarboWASTE und CarboDISP berücksichtigt. Auf die dort beschriebenen methodischen Ansätze soll –soweit im konkreten Fall möglich- zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse sind auch für das neu begonnene Projekt C-14-Recy von Interesse.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Die bisherigen Ergebnisse wurden im Zuge der KONTEC 2021 im August 2021 in einem Plenarvortrag vorgestellt. Auf die Proceedings wird verwiesen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9407B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt GraKon – Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit, Teilprojekt B Teilprojekt B: Entwicklung und Erprobung von Verfahrensansätzen zur Vergasung von Reaktorgraphit für die optimale Abtrennung radioaktiver Kontaminationen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 612.103,37 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Bernd Meyer / Prof. Martin Gräbner	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:Bernd.Meyer@iec.tu-freiberg.de">Bernd.Meyer@iec.tu-freiberg.de</a> <a href="mailto:Martin.Graebner@iec.tu-freiberg.de">Martin.Graebner@iec.tu-freiberg.de</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine maßgebliche Größe für die Bemessung der zu errichtenden deutschen Endlagerkapazitäten für radioaktive Abfälle ist die Einlagerung von C-14-haltigem Reaktorgraphit/Kohlestein. Es bestehen derzeit erhebliche Unsicherheiten, ob die geplante Endlagerkapazität die Aufnahme der vorhandenen Mengen an Reaktorgraphit zulässt. Gegenwärtig sind keine Konditionierungsverfahren bekannt, die eine substantielle Verringerung der einzulagernden Menge C-14-haltigen Graphits ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund besteht die Zielstellung des Vorhabens darin, eine neue Prozesskette modernster Dekontaminationsverfahren für die endlagergerechte Behandlung von radioaktivem Reaktorgraphit zu entwickeln und im Labor- bzw. Technikumsmaßstab zu erproben.

Das Teilprojekt B verfolgt in diesem Rahmen das Ziel, Möglichkeiten zur Überführung von Reaktorgraphit in gasförmige Komponenten zu erproben als Voraussetzung, um eine gezielte Abtrennung des kontaminierten Kohlenstoffes in der Gasphase und damit eine Minimierung und Spezifizierung des einzulagernden Materials realisieren zu können.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Arbeitsplan baut sich entlang der avisierten Gesamtprozesskette auf und umfasst die Graphitcharakterisierung, die Oberflächendekontamination, die Umsetzung des Graphits in die Gasphase, die Radionuklidabtrennung und die Umsetzung zu endlagergerechten Feststoffen. Die entwickelte Gesamtprozesskette wird bilanziert und Konzepte für die technische Realisierung abgeleitet. Die Prozessschritte sollen auf der Basis von Reaktorgraphit aus einem Forschungsreaktor getestet werden. Im Teilprojekt B steht die Betrachtung des thermochemischen Vergasungsverhaltens von Reaktorgraphit im Mittelpunkt und umfasst:

- labortechnische Untersuchungen des Konversionsverhaltens von Reaktorgraphit,
- die Identifikation geeigneter Vergasungsprozesse,
- die Entwicklung einer Prozesskette für die optimale Gaserzeugung sowie
- die Mitwirkung bei der Gesamtprozesskettenbilanzierung und –konzeption.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Die Arbeiten im Berichtszeitraum beziehen sich auf AP 320 (Untersuchung des Konversionsverhaltens) und AP 330 (Identifikation geeigneter Konversionsprozesse) sowie auf AP 340 (Entwicklung der Prozesskette für die Vergasung).

AP 320 Untersuchung des Konversionsverhaltens

- Der Schwerpunkt der labortechnischen Untersuchungen lag im Berichtszeitraum auf der Konversion des Reaktorgraphits mit molekularem Wasserstoff und auf vergleichenden Untersuchungen mit synthetischem Graphit zur Konversion mit CO<sub>2</sub>.
- Zur Ermittlung der Kinetik der Hydrierung von Reaktorgraphit wurden thermogravimetrische Versuche bei Variation des Systemdruckes (1, 5, 20 und 40 bar) und der Temperatur (900 bis 1100 °C in Temperaturschritten von 50 °C) untersucht. Die Umsatzgeschwindigkeit erhöht sich mit zunehmender Temperatur und mit der Systemdruckerhöhung bis 20 bar. Bei 40 bar verringert sich die Reaktionsgeschwindigkeit. Das ist besonders bei niedrigeren Temperaturen (900 und 950 °C) ausgeprägt. Bei 1000, 1050 und 1100 °C nähern sich die Umsatzkurven bei 40 bar denen bei 20 bar an.
- Ausgehend von einem Potenzansatz für die Geschwindigkeitsgleichung wurden auf der Basis der Experimente die kinetischen Parameter ermittelt. Bei der Erhöhung des Druckes von 5 bar auf 20 bzw. 40 bar wurde eine Herabsetzung der Grenztemperatur zwischen chemisch kontrolliertem und porediffusionskontrolliertem Regime von 1100 °C auf 1000 °C beobachtet, wobei die Aktivierungsenergie und der präexponentielle Faktor für die eigentliche chemische Reaktion ähnlich geblieben sind ( $E_a = 270$  kJ/mol und  $k_0 = 5,5 \times 10^5$  1/s bei 5 bar gegenüber  $E_a = 266$  kJ/mol und  $k_0 = 3,9 \times 10^5$  1/s bei 20 bar). Im porediffusionskontrollierten Bereich wurden folgende Werte ermittelt:  $E_a = 130$  kJ/mol und  $k_0 = 1,1$  1/s bei 20 bar und  $E_a = 136$  kJ/mol und  $k_0 = 0,8$  1/s bei 40 bar.
- Für die Reaktionsordnung der Methanisierungsreaktion von Reaktorgraphit wurde für den chemisch kontrollierten Bereich ein Wert von  $0,64 \pm 0,01$  bestimmt.
- Die Charakterisierung des synthetischen Graphits ergab einen geringfügig niedrigeren Kohlenstoffgehalt und einen höheren Aschegehalt als der Reaktorgraphit. Anhand der Roh- und Reindichte wurde eine Porosität von 9,7 % gegenüber 17,2 % bei Reaktorgraphit ermittelt. Die BET-Oberfläche ist beim synthetischen Graphit mit ca. 0,02 m<sup>2</sup>/g deutlich kleiner als bei Reaktorgraphit mit 10 m<sup>2</sup>/g (N<sub>2</sub>, 77 K, 3-Punkt).
- Die Ermittlung der Aktivierungsenergie und des präexponentiellen Faktors für die CO<sub>2</sub>-Vergasung des synthetischen Graphits erfolgte entsprechend Arrhenius-Ansatz. Im Unterschied zu den Untersuchungen mit dem Reaktorgraphit konnte für die Boudouard-Reaktion kein porediffusionskontrollierter Bereich nachgewiesen werden. Der chemisch kontrollierte Bereich geht bei ca. 1150 °C direkt in den filmdiffusionskontrollierten Bereich über. D. h. die gering ausgebildete Porenstruktur ohne nennenswerte innere Oberfläche spielt bei der Konversion des synthetischen Graphits im Unterschied zum Reaktorgraphit keine Rolle.
- Die Aktivierungsenergie für die CO<sub>2</sub>-Vergasung des synthetischen Graphits beträgt im chemisch kontrollierten Bereich bei einem Umsatz von 30 Ma.-% 243 kJ/mol (vs. 294 kJ/mol bei Reaktorgraphit) und verändert sich bei 50 und 70 Ma.-% Umsatz um weniger als 1,5 %. Die relative Konstanz der Aktivierungsenergie bei steigendem Umsatzgrad weist darauf hin, dass die Struktur von Graphit bis zu hohen Kohlenstoffumsätzen stabil bleibt. Die aus den kinetischen Parametern ermittelten Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten belegen die höhere Reaktivität des synthetischen Graphits gegenüber Reaktorgraphit trotz der weniger gut ausgebildeten Porenstruktur.

AP 330 und AP 340:

- Neben den in den letzten Zwischenberichten vorgestellten Vergasungs- bzw. Oxidationskonzepten ist die hydrierende Vergasung des Reaktorgraphits als weiteres Konversionskonzept betrachtet worden. Der Vorteil eines solchen Konzeptes besteht darin, dass die direkte Umwandlung des Reaktorgraphits zu Methan als gasförmiger Kohlenstoffträger möglich ist und in der Form für die nachfolgende Isotopenabtrennung bereitgestellt werden kann. Auf dieser Basis kann eine trockene Gasaufbereitungsstecke aufgebaut werden, die mit entsprechenden Vorteilen verbunden ist. Die Wirkung von nicht umgesetztem Wasserstoff und von Spuren von ggf. entstehenden höheren Kohlenwasserstoffen muss geprüft werden.
- Neben Konzepten für einen kontinuierlichen Konversionsbetrieb wurde eine halbkontinuierliche (semi-batch) Prozessführung betrachtet. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Konversion des reaktionsträgen Reaktorgraphits durch die Realisierbarkeit langer Verweilzeiten an die Kapazität der nachfolgenden Isotopentrennung anzupassen und das ggf. erforderliche Einschmelzen des Konversionsrückstandes zu optimieren. Folgende Prozessstufen wurden in die Prozesskette einbezogen: Zerkleinerung des Reaktorgraphits, Wassertoffbereitstellung, Konversionsreaktor mit Schlacke-/Ascheausschleusung, Gaskühlung und -reinigung. Die konkrete Gaskonditionierung wird entsprechend den Anforderungen der Isotopenanreicherung angepasst.
- Für den Konversionsprozess wurde ein thermodynamisches Modell auf der Basis der Software ASPEN Plus erstellt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

Die geplanten Weiterarbeiten betreffen die Weiterführung des AP 320 und AP 330 sowie des AP 340. Die nächsten Schritte umfassen im Detail:

- Weiterführung der reaktionskinetischen Untersuchungen hinsichtlich der Überprüfung des Korngrößeneinflusses und dem Vergleich der Konversion des synthetischen Graphits unter Verwendung weiterer Vergasungsmittel,
- Weiterentwicklung des Konversionskonzeptes auf der Basis der experimentell ermittelten Prozessparameter und unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Projektpartners zur Isotopenabtrennung,
- Weiterentwicklung thermodynamischer Modelle für den Konversionsprozess auf der Basis der Software ASPEN Plus.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es sind keine Änderungen gegenüber der Antragsstellung abzusehen.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Projekt sind derzeit keine Berichte und Veröffentlichungen entstanden.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9410A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie Teilprojekt: Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2019 bis 31.08.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 187.025,17 €	
<b>Projektleiter/-in:</b> Matthias Dewald	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> matthias.dewald@grs.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines automatisierbaren Systems zur zuverlässigen Charakterisierung und Quantifizierung des C-14-Gehalts von Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), das im industriellen Bereich eingesetzt werden kann und Schwierigkeiten z. B. im Bereich der Untergrundunterdrückung oder aufwändiger Probenaufbereitung bei bisher genutzten Verfahren wie Liquid Scintillation Counting (LSC) umgeht und gleichzeitig in der Lage ist, das Unterschreiten der künftig geltenden Freigabewerte zuverlässig zu belegen. Ferner sollen Schnittstellen eines solchen AMS-Systems für die Messung weiterer Radionuklide definiert werden, um künftig die simultane Messung von C-14, Cl-36 und H-3 aus einer einzelnen Probe zu ermöglichen.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in die Teilprojekte „Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie“ (Universität zu Köln) und „Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen (GRS gGmbH). Ziel des hier beantragten Teilvorhabens ist, auf Basis der Ergebnisse der Reaktorgraphit-Charakterisierung mittels AMS und unter Berücksichtigung der mit der neuen Strahlenschutzgesetzgebung einhergehenden Freigabekriterien Empfehlungen für eine konkrete Freigabeprozedur zu definieren. Darüber hinaus soll bewertet werden, ob eine Charakterisierung von Reaktorgraphit mittels AMS als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden kann, und welche Bedeutung die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Entsorgung vorhandener Reaktorgraphit-Bestände in Deutschland hat.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Eine ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans findet sich in der Vorhabensbeschreibung. Die Arbeiten werden sind in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1 Voruntersuchungen an unbestrahlten Graphitproben
- AP 2 Voruntersuchungen an bestrahlten Reaktorgraphitproben
- AP 3 Herstellung von Referenz-Probenmaterial für die AMS-Messungen
- AP 4 Entwicklung des Gassystems mit Elemental Analyzer und Verbindung zur AMS-Anlage
- AP 5 Test des Gassystems zur Verdünnung über die Charakterisierung der bestrahlten Referenz-Graphitproben
- AP 6 Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfaden vor dem Hintergrund der Ergebnisse

- AP 7 Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen
- AP 8 Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle
- AP 9 Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse
- AP 10 Verbundkoordination und Projektmanagement

Im folgenden Balkenterminplan sind die Einzelnen Arbeitspakete in ihrer zeitlichen Abfolge und Zuordnung dargestellt. Gegenüber dem bisherigen Balkenterminplan aus der Antragsphase haben sich durch pandemiebedingt ausgefallene Messzeiten Verzögerungen ergeben. Daher wurde der Meilenstein Ende des 1. Quartals 2021 nicht wie geplant erreicht. Da außerdem ein unerwarteter Mitarbeiterwechsel stattfand, wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und genehmigt, sodass sich die Bearbeitung der Arbeitspakete 5 bis 10 bis ins dritte Quartal 2022 erstreckt (gestrichelte Bereiche).

	2019				2020				2021				2022			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1 <i>Voruntersuchung unbestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 2 <i>Voruntersuchung bestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 3 <i>Herstellung Referenzprobenmaterial</i>			UK													
AP 4 <i>Entwicklung des Gassystems</i>		UK														
AP 5 <i>Test Gassystem mit Referenzmaterial</i>		UK														
AP 6 <i>Betrachtung/Bewertung Entsorgungspfade</i>		GRS														
AP 7 <i>Messung realer Proben aus Anlagen</i>		GRS			UK											
AP 8 <i>Beurteilung der Ergebnisse</i>		GRS														
AP 9 <i>Aufarbeitung/Veröffentlichung</i>		UK														
AP 10 <i>Verbundkoordination</i>		GRS														

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

#### AP 6: Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfadern vor dem Hintergrund der Ergebnisse

Im Berichtszeitraum fand die Teilnahme an der KONTEC 2021 statt. Das laufende Projekt wurde mit vorläufigen Ergebnissen auf der KONTEC 2021 in einem Plenarvortrag präsentiert.

Des Weiteren wurden die Arbeiten zur Betrachtung und Bewertung möglicher Entsorgungspfade im nationalen und internationalen Umfeld fortgesetzt. Die Ergebnisse der Recherche zu grundlegenden Eigenschaften und der Wechselwirkung des Graphits mit typischen Strahlungsfeldern sowie die Charakterisierung und die Entsorgungsproblematik werden fortlaufend dokumentiert, sodass sie als Teil des Abschlussberichtes genutzt werden können. Im Zuge des Vorhabens aufkommende Fragestellungen werden laufend bearbeitet und nachgepflegt.

*AP 7: Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen*

Durch die Messungen der Graphitproben von den kerntechnischen Versuchs- und Prototypanlagen am Standort Karlsruhe KIT Campus Nord konnte gezeigt werden, dass die AMS-Messungen mithilfe der Feststoffverdünnung der Proben erfolgen können. Erste Ergebnisse hierzu wurden auf der KONTEC 2021 präsentiert.

*AP 8: Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle*

Im Berichtszeitraum wurde die Einschätzung von Messergebnissen definiert bestrahlter Graphitproben fortgesetzt. Es wurde diskutiert, wie beobachtete Inhomogenitäten zustande kommen und künftig behoben werden können. Es wurden Messergebnisse verschiedener Proben betrachtet, teils definiert bestrahltes Material, teils Material aus Reaktoren. Ein direkter Vergleich zwischen Feststoff- und Gasverdünnung steht zum Ende des Berichtszeitraumes noch aus.

Des Weiteren fand die Teilnahme an der ursprünglich für das Jahr 2020 vorgesehenen AMS-15 Konferenz statt, die aufgrund der COVID-19 Pandemie als reine Online-Konferenz abgehalten wurde. Hierfür wurde ein Poster zum Verbundvorhaben erstellt und präsentiert.

*AP 9: Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse*

Im Berichtszeitraum wurde mit der Erstellung des Abschlussberichtes begonnen. Für die KONTEC 2021 wurde neben dem Plenarvortrag ein *Full Paper* eingereicht. Für die AMS-15 Konferenz wurde ein Poster erstellt.

*AP 10: Verbundkoordination und Projektmanagement*

Im Berichtszeitraum fanden weiterhin Arbeiten zur Verbundkoordination statt, wie z. B. die Organisation regelmäßiger Projekttreffen. Aufgrund der anhaltenden Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie wurden Projekttreffen weiterhin per Videokonferenz durchgeführt.

**4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Arbeiten zur Betrachtung und Bewertung möglicher Entsorgungspfade im nationalen und internationalen Umfeld werden wie bisher fortgesetzt (AP 6).

Ein Schwerpunkt wird im kommenden Halbjahr weiterhin auf der Bewertung der vom Verbundpartner Uni Köln erzeugten Messwerte liegen. Auf dieser Basis können die zentralen Fragestellungen des Vorhabens bearbeitet werden (AP 7 und 8).

Diese Daten dienen auch als Basis für Arbeiten im AP 6 und AP 8, die entsprechend nachgezogen werden.

Die Ergebnisse der Arbeiten, die im Rahmen der AP 6 bis 8 erarbeitet werden, werden im kommenden Halbjahr zusammengefasst und der Abschlussbericht erstellt.

Die Arbeiten zur Verbundkoordination werden wie bisher fortgesetzt (AP 10).

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es besteht ein thematischer Bezug zum Forschungsvorhaben „Erforschung der Anforderungen an eine radiologische Charakterisierung zur Planung und Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen“, (BMU-Vorhaben 4717R01364). Dieses Vorhaben wurde zum 30. Juni 2020 abgeschlossen. In diesem Forschungsvorhaben wurde untersucht, inwieweit sich AMS zur Charakterisierung von Reaktorbeton im Hinblick auf schwer messbare Radionuklide, wie z.B. Ca-41 eignet. Die Ergebnisse sind im zugehörigen Abschlussbericht dokumentiert.

Ein weiterer Bezug besteht zum Forschungsvorhaben mit dem Titel „Entwicklung eines AMS-Messsystems zur radiologischen Charakterisierung von aktivierten Reaktorkomponenten in der Stilllegung hinsichtlich der Freigabefähigkeit“ (BMU-Vorhaben 3621E03520). In diesem

Forschungsvorhaben wird der Einsatz der AMS-Messtechnik für die Freigabe unter Nutzung von C-14 als Leitnuklid für die Charakterisierung verschiedener Materialien untersucht.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Berichtszeitraum wurden Ergebnisse des laufenden Vorhabens auf der KONTEC 2021 in einem Plenarvortrag präsentiert und ein Paper erstellt. Für die AMS-15 Konferenz wurde ein Posterbeitrag erstellt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9410B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Universität zu Köln	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie TP: Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2019 bis 31.08.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 627.219,60 € inkl. PP
<b>Projektleiter/-in:</b> Erik Strub	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> erik.strub@uni-koeln.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines automatisierbaren Systems zur zuverlässigen Charakterisierung und Quantifizierung des C-14-Gehalts von Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), das im industriellen Bereich eingesetzt werden kann und Schwierigkeiten z.B. im Bereich der Untergrundunterdrückung oder aufwändiger Probenaufbereitung bei bisher genutzten Verfahren wie Liquid Scintillation Counting (LSC) umgeht und gleichzeitig in der Lage ist, das Unterschreiten der künftig geltenden Freigabewerte zuverlässig zu belegen. Ferner sollen Schnittstellen eines solchen AMS-Systems für die Messung weiterer Radionuklide definiert werden, um künftig die simultane Messung von C-14, Cl-36 und H-3 aus einer einzelnen Probe zu ermöglichen.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in die Teilprojekte „Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie“ (Universität zu Köln) und „Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen (GRS gGmbH). Ziel des hier beantragten Teilvorhabens ist, auf Basis der Ergebnisse der Reaktorgraphit-Charakterisierung mittels AMS und unter Berücksichtigung der mit der neuen Strahlenschutzgesetzgebung einhergehenden Freigabekriterien Empfehlungen für eine konkrete Freigabeprozedur zu definieren. Darüber hinaus soll bewertet werden, ob eine Charakterisierung von Reaktorgraphit mittels AMS als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden kann, und welche Bedeutung die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Entsorgung vorhandener Reaktorgraphit-Bestände in Deutschland hat.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Eine ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans findet sich in der Vorhabensbeschreibung. Die Arbeiten werden sind in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1 Voruntersuchungen an unbestrahlten Graphitproben
- AP 2 Voruntersuchungen an bestrahlten Reaktorgraphitproben
- AP 3 Herstellung von Referenz-Probenmaterial für die AMS-Messungen
- AP 4 Entwicklung des Gassystems mit Elemental Analyzer und Verbindung zur AMS-Anlage
- AP 5 Test des Gassystems zur Verdünnung über die Charakterisierung der bestrahlten Referenz-Graphitproben

- AP 6 Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfaden vor dem Hintergrund der Ergebnisse
- AP 7 Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen
- AP 8 Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle
- AP 9 Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse
- AP 10 Verbundkoordination und Projektmanagement

Im folgenden Balkenterminplan sind die einzelnen Arbeitspakete in ihrer geplanten zeitlichen Abfolge und Zuordnung dargestellt. Die schraffierten Flächen stellen die Änderungen auf Grund der kostenneutralen Verlängerung dar (s. 3.)

	2019				2020				2021				2022			
	I	II	III	IV												
AP 1 <i>Voruntersuchung unbestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 2 <i>Voruntersuchung bestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 3 <i>Herstellung Referenzprobenmaterial</i>			UK													
AP 4 <i>Entwicklung des Gassystems</i>		UK														
AP 5 <i>Test Gassystem mit Referenzmaterial</i>		UK														
AP 6 <i>Betrachtung/Bewertung Entsorgungspfade</i>																
AP 7 <i>Messung realer Proben aus Anlagen</i>					UK											
AP 8 <i>Beurteilung der Ergebnisse</i>																
AP 9 <i>Aufarbeitung/Veröffentlichung</i>																
AP 10 <i>Verbundkoordination</i>																

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogrammunkten)

Die Arbeiten zu Voruntersuchungen an bestrahlten Graphitproben (AP2) wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Bei den Messungen im Mai 2021 waren Inkonsistenzen in den Messungen beobachtet worden, die darauf hindeuteten, dass die Proben ungenügend homogenisiert worden waren. Im Juli/August 2021 wurden diese Messungen erneut überprüft. Dabei ergab sich, dass die vermuteten Inkonsistenzen wahrscheinlich auf Reservoireffekte im Gassystem zurückgeführt werden können. Wird die C-14-Konzentration der Messproben durch Verdünnung angepasst, kann dieser Effekt weitgehend vermieden werden. Damit wurde das AP2 abgeschlossen. In der gleichen Messzeit wurden reale Proben aus kerntechnischen Anlagen gemessen, jeweils ebenfalls mehrfach. Die Messzeiten aus AP5 und AP7, in denen abschließend die Feststoff- und die Gasverdünnung verglichen werden, sind für das erste Quartal 2022 geplant. Ergebnisse wurden bei der AMS-15-Konferenz präsentiert und werden im Nachgang publiziert (AP9, s. 6).

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die begonnenen Arbeiten werden wie fortgesetzt wie nach der angepassten Planung in Folge der zuletzt beantragten kostenneutralen Verlängerung beantragt und genehmigt (s. Balkenplan in Abschnitt 2).

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es besteht ein thematischer Bezug zum Forschungsvorhaben „Erforschung der Anforderungen an eine radiologische Charakterisierung zur Planung und Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen – Bestimmung von  $^{41}\text{Ca}$  im Bioschild eines Leistungsreaktors mittels AMS“, (BMU-Vorhaben 3617R01364). In diesem Vorhaben wird derzeit untersucht, inwieweit sich AMS zur Charakterisierung von Reaktorbeton im Hinblick auf schwer messbare Radionuklide wie z.B.  $^{41}\text{Ca}$  eignet.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

An der online stattfindenden AMS-15 Konferenz (November 2021) wurde mit zwei Beiträgen teilgenommen. Die Beiträge zur AMS-15-Konferenz können anschließend *peer reviewed* in *Nuclear Instruments and Methods B* veröffentlicht werden. Die Einreichungsfrist ist Ende April 2022. Es ist geplant, beide Beiträge zu veröffentlichen.

Berichtszeitraum: 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9413A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200 733, 80007 München Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Standort Dresden-Klotzsche, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt „Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen“. Teilprojekt A: „Verfahrensentwicklung zur Dekontamination und Konditionierung der Prozessmedien einschließlich Gewinnung/ Herstellung und Charakterisierung von Betonproben“	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 31.10.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 736.792,89 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Chem. H.–J. Friedrich	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Da in Beton eindringende radioaktive Stoffe größtenteils an den sog. Zementstein gebunden werden, kann durch die Separierung des Zementsteins von den Betonzuschlagstoffen eine deutliche Mengenreduzierung endzulagernder radioaktiver Abfälle erwartet werden. Als Trennverfahren bietet sich die elektrohydraulische Zerkleinerung an. Es soll deshalb an mehreren relevanten Betonsorten untersucht werden, ob und mit welchen Arbeitsparametern mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung eine hinreichende Dekontamination erreichbar ist und inwieweit die mineralischen Zuschlagstoffe freigebbar sind. Zur Verifizierung des Ansatzes sind zunächst Voruntersuchungen mit inaktivem Referenzmaterial und mit getracerten Prüfkörpern vorgesehen. Es schließen sich die Errichtung einer Laborversuchsanlage und die Durchführung von Trennversuchen mit realen kontaminierten Betonproben an. Bestandteil des Arbeitsprogramms sind Untersuchungen zur Dekontamination/Recycling des als Koppelmedium verwendeten Wassers und zur Konditionierung sekundärer Abfälle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

- AP1: Projektkoordination und Administratives
- AP2 Bereitstellung und Charakterisierung von Beton aus kerntechnischen Anlagen
- AP3 Untersuchungen zur Verifizierung der Kontaminationsverteilung in radioaktiv kontaminierten Betonproben
- AP4 Aufbau der Versuchsanlage zur Elektroimpulszerkleinerung, Durchführung von Versuchen zur Separation an synthetischen und realen Betonproben
- AP5 Untersuchungen zur Behandlung des Prozesswassers
- AP6 Experimentelle Untersuchungen zur Konditionierung der erhaltenen Stofffraktionen
- AP7 Stoffstrom-/Radionuklidbilanzierung, Verfahrensbewertung, Fortschreibung Verwertungskonzept

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

AP1: Die Aktivitäten zu AP 1 erfolgten planmäßig.

AP2: Die Charakterisierungen wurden weitgehend abgeschlossen. Je nach Erfordernis erfolgten noch einzelne Analysen an Betonproben, die als Ausgangsmaterial für die Versuche dienen.

AP3: Mit den assoziierten Partnern preussenelektra GmbH und VKTA wurden die Spezifikationen für zu übergebende radioaktiv kontaminierte Betonproben für Zerkleinerungs- und Dekontaminationsversuche abgestimmt.

AP4: Das Arbeitspaket wird federführend durch den Verbundpartner ImpulsTec GmbH bearbeitet. Es fanden weitere technische und strahlenschutztechnische Abstimmungen zur Aufstellung und zum Betrieb einer Laboranlage im Radionuklidlabor des IKTS statt. Vom Verbundpartner wurden zur Durchführung weiterer Versuche zur Prozesswasserbehandlung entsprechende Wasserproben erzeugt und übergeben.

AP5: Die Feststoffe aus den Zerkleinerungsversuchen von Betonproben aus dem KKW Stade und von VKTA Rossendorf wurden klassiert und in drei Fraktionen aufgeteilt und getrocknet. Die Fraktionen mit einem Korndurchmesser  $>0,8$  mm (jeweils ca. 50% des Materials) wurden nachfolgend mit unterschiedlicher Dauer mit verdünnter HCl gewaschen und erneut verwogen. Der dabei ermittelte Gewichtsverlust lag bei max. 1%. Diese Massenverluste beim Waschen werden als die Kiessandkörner umhüllende Zementreste interpretiert und bei der weiteren Optimierung des elektrohydraulischen Zerkleinerungsverfahrens berücksichtigt.

AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

AP7: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP1: Das nächste Verbundmeeting ist für das II. Quartal 2022 geplant.

AP2: Die Untersuchungen sind im Wesentlichen abgeschlossen. Nur bedarfsweise erfolgen noch ergänzende Analysen.

AP3: Die Versuche mit radioaktiv getracerten Betonproben zur Verifikation werden fortgesetzt und Versuche mit realen radioaktiv kontaminierten Betonproben durchgeführt.

AP4: Die Umsetzung einer Versuchsanlage zur elektrohydraulischen Fragmentierung in das Radionuklidlabor ist für März/April 2022 geplant. Es finden regelmäßige Abstimmungen statt.

AP5: Die Untersuchungen werden fortgesetzt, insbesondere im Hinblick auf den Einfluss des Ionenaustauschermembrantyps auf den Stoffübergang und auf die maximal erreichbare Konzentration im Konzentratstrom der Elektrodialyse. Im Zuge dessen werden auch die Untersuchungen zur Erhöhung der Abtrennung von Sr und Cs weitergeführt.

AP6: Die Bearbeitung wird im I. Quartal 2022 begonnen.

AP7: Ausgehend von den Ergebnissen zu AP3 wird die Bearbeitung fortgesetzt.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Für das BMBF-Förderprojekt WARREBA, Fkz. 15S9412 wurden Daten aus der Charakterisierung der Betonsorten zur Verfügung gestellt. Es besteht gelegentlicher Kontakt zu den Bearbeitern, zuletzt anlässlich des RCA-workshops im Juni 2021.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Zur KONTEC 2021 konnten bisherige Ergebnisse des Vorhabens im Rahmen der KONTEC-direkt präsentiert werden.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9413B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> ImpulsTec GmbH, Wilhelm-Eichler-Straße 34, 01445 Radebeul	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt „Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen“ Teilprojekt B: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung von radioaktiv kontaminierten Zementstein mittels elektrohydraulischer Fragmentierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 31.10.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 56.592,78 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stefan Eisert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stefan.eisert@impulstec.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Da in Beton eindringende radioaktive Stoffe größtenteils an den sog. Zementstein gebunden werden, kann durch die Separierung des Zementsteins von den Betonzuschlagstoffen eine deutliche Mengenreduzierung endzulagernder radioaktiver Abfälle erwartet werden. Als Trennverfahren bietet sich die elektrohydraulische Zerkleinerung an. Es soll deshalb an mehreren relevanten Betonsorten untersucht werden, ob und mit welchen Arbeitsparametern mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung eine hinreichende Dekontamination erreichbar ist und inwieweit die mineralischen Zuschlagstoffe freilegbar sind. Zur Verifizierung des Ansatzes sind zunächst Voruntersuchungen mit inaktivem Referenzmaterial und mit getracerten Prüfkörpern vorgesehen. Es schließen sich die Errichtung einer Laborversuchsanlage und die Durchführung von Trennversuchen mit realen kontaminierten Betonproben an. Bestandteil des Arbeitsprogramms sind Untersuchungen zur Dekontamination/Recycling des als Koppelmedium verwendeten Wassers und zur Konditionierung sekundärer Abfälle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

AP1: Vorbereitende Arbeiten

AP3: Aufbau der Versuchsanlage zur Elektroimpulszerkleinerung, Durchführung von Versuchen zur Separation an synthetischen und realen Betonproben

AP6: Stoffstrom-/Radionuklidbilanzierung, Verfahrensbewertung, Fortschreibung Verwertungskonzept

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

AP1: Im Berichtszeitraum wurde der Aufbau des Versuchstandes für die Nutzung beim Projektpartner Fraunhofer IKTS für den Aufschluss von kontaminierten Betonproben weitergeführt. Nach Lieferung des Containers als Lärm- und EMV-Kapselung soll der Aufbau fertiggestellt werden. Im weiteren Projektverlauf soll der Teststand temporär am Fraunhofer IKTS installiert und für die Behandlung von radioaktiven Betonmuster verwendet werden.

AP3: Die Arbeiten zur systematischen Untersuchung des Betonaufschlusses wurden fortgesetzt. Der Zerlegeprozess wurde für verschiedene Betonproben (Bohrkerne) unter Nutzung des optimierten Versuchsreaktors weitergeführt. Dabei stand weiterhin die Optimierung der Prozessführung zur Verringerung der Restzementgehalte der Kiesfraktionen in den Fokus. Die Arbeiten mit dem Ziel die höchstmögliche Reinheit des Kieses herzustellen dauern an. Weiterhin wird an der Methodik der Auswertung zur Qualifizierung der Ergebnisse gearbeitet, um eine einfache Bewertung der Einzelversuche und eine Vergleichbarkeit verschiedener Betonproben zu vereinfachen.

AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP1: Geplant ist die Umsetzung des Konzeptes der temporären Versuchsanlage für den Aufschluss kontaminierter Betonproben am Fraunhofer IKTS.

AP3: Die Arbeiten zur Entwicklung des Aufschlussprozesses für verschiedene Betonproben sollen fortgeführt werden. Ziel dabei ist es die maximal erzielbare Reinheit zu ermitteln.

AP6: Die Bearbeitung ist erst im letzten Jahr der Laufzeit vorgesehen.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Derzeit werden keine direkten Bezüge zu anderen Vorhaben gesehen. Allgemein kann das Projekt der Gruppe von Vorhaben zugeordnet werden, die eine Reduzierung des Aufkommens endzulagernder radioaktiver Rückstände zum Ziel haben.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

-keine-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9423A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31, 76131 Karlsruhe	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> „Nasssiegung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen“ (NAMASK) - Teilprojekt: Durchführung der Versuche mit inaktivem Probenmaterial	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2021 bis 31.12.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 672.256,85 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. S. Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, das aus dem WASS-Schnitt stammende Abfallgemisch (Suspension aus Wasser, inaktiven Abrasivpartikeln und Stahlpartikeln des radioaktiven Stahls) zu trennen. Zuerst wird gesiebt, dann die feine Fraktion abfiltriert und die im Sieb zurückgehaltene grobe Fraktion mit einem Magnetfilter nachbehandelt. Durch den Siebvorgang und die magnetische Abtrennung der Stahlpartikel entsteht ein selektiertes Abrasiv, das der WASS-Anlage für einen erneuten Schnitt wieder zugeführt werden kann. So soll sich der Sekundärabfall um 50-75% reduzieren. Das KIT-TMB und KIT-INE werden den Einsatz von Korrosionsinhibitoren mit anschließender Aufbereitung der Korngemische erproben, um somit das Schneiden ferritischer Stähle zu ermöglichen. Zur Erprobung des MaSK-Verfahrens werden WASSSchnitte mit ausgewählten nicht radioaktiven austenitischen und ferritischen Stählen durchgeführt. Danach sollen die einzelnen Prozessschritte, Siebung, Filtration und Magnetseparation verbessert werden. Dann werden die Prozessschritte gemeinsam durchgeführt und es wird ermittelt, welche Wiederverwendungsquote erreicht werden kann. Die Versuche mit der Separationsanlage werden am KITTMB durchgeführt, so hat bei diesen Versuchen das KIT-TMB die Federführung. Besonders die Verbesserung und Erprobung der einzelnen Prozessschritte werden am KIT-TMB bearbeitet und zur wissenschaftlichen Verwertung genutzt. Zudem sind Versuche mit radioaktiven Proben im Kontrollbereich des KIT-INE vorgesehen unter Leitung der Mitarbeiter des KIT-INE. Die Herstellung und der Transport werden von dem Verbundpartner ORANO durchgeführt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen
- AP 2: Probenherstellung mit der WASS-Anlage
- AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage
- AP 4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen
- AP 5: Dokumentation der Ergebnisse

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitspaketen)

AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Das neuentwickelte Siebssystem, welches im Unterdruck betrieben wird, wurde aufgebaut und in Vorversuchen getestet. Zudem wurde die Verschaltung und die Fließrichtung der neuen Namask-Anlage getestet. Vorversuche mit den Magnetfiltern in der neuen Verschaltung wurden durchgeführt, um die Vor- und Nachteile der Betriebsweisen (Über-/Unterdruck) im neuen Aufbau der Anlage zu testen.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu den Arbeitspaketen)

AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Die nächste Phase des Umbaus beinhaltet den Aufbau der Pilotanlage. Dies umfasst den Aufbau des Rahmens samt Druckluftversorgung, Einbau des Siebsystems, Magnetfilters, Pumpen und Beutelfilter. Betriebsweise und Aufbau des Magnetfiltersystems werden festgelegt und Magnetseparationsversuche werden durchgeführt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

„Separation System for the Treatment of Secondary Waste from the Waterjet-Abrasive-Suspension-Cutting“, Paper und Vortrag, DEM 2021 (France, Avignon, 2021, September 13-15).

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9423B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen Teilprojekt: Durchführung von Versuchen mit radioaktivem Probenmaterial	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2021 bis 31.12.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 692.845,96 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Horst Geckeis	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> horst.geckeis@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ein Verfahren zur Zerlegung eines Reaktordruckbehälters ist das Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidverfahren (WASS), bei dem das Material mit einem speziellen Hochdruckwasserstrahl geschnitten wird. Dieses Verfahren bietet viele technische Vorteile, hat aber den Nachteil zusätzlichen beträchtlichen Sekundärabfalls. Beim WASS-Schnitt von Stahlkomponenten im Rückbau kerntechnischer Anlagen entsteht ein Abfallgemisch aus inaktiven Abrasivpartikeln und radioaktivem Schnittfugenmaterial. Ziel des Vorhabens ist es, das aus WASS-Schnitten stammende Abfallgemisch (Suspension aus Wasser, inaktiven Abrasivpartikeln und Stahlpartikeln des radioaktiven Stahls) so zu trennen, dass der Sekundärabfall maßgeblich reduziert wird. Das Abfallgemisch wird zunächst gesiebt, dann die feine Fraktion abfiltriert und die im Sieb zurückgehaltene grobe Fraktion mit einem Magnetfilter nachbehandelt (MaSK-Verfahren). Durch den Siebvorgang und die magnetische Abtrennung der Stahlpartikel entsteht ein selektiertes Abrasiv, das der WASS-Anlage für einen erneuten Schnitt wieder zugeführt werden kann. So soll sich der Sekundärabfall um 50-75% reduzieren. Das KIT-INE und KIT-TMB werden den Einsatz von Korrosionsinhibitoren mit anschließender Aufbereitung der Korngemische erproben, um somit das Schneiden ferritischer Stähle zu ermöglichen. Zur Erprobung des MaSK-Verfahrens werden WASS-Schnitte mit ausgewählten nicht radioaktiven austenitischen und ferritischen Stählen durchgeführt. Danach sollen die einzelnen Prozessschritte, Siebung, Filtration und Magnetseparation verbessert werden. Dann werden die Prozessschritte gemeinsam durchgeführt und es wird ermittelt, welche Wiederverwendungsquote erreicht werden kann. Alle Arbeiten werden gemeinsam von den Verbundpartnern des KIT durchgeführt, wobei die Federführung bei den Analysen beim KIT-INE liegt. Zudem sind Versuche mit radioaktiven Proben im Kontrollbereich des KIT-INE vorgesehen. Diese Arbeiten werden vom KIT-INE durchgeführt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen
- AP 2: Probenherstellung mit der WASS-Anlage
- AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage
- AP 4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen
- AP 5: Dokumentation der Ergebnisse

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitspaketen)**

Mit mehreren Mitarbeitern des KIT-INE wurden die Stellenausschreibung, das Bewerbungs- und das Auswahlverfahren für die Ingenieursstelle und die Doktorandenstelle unter den jeweiligen COVID-19 Beschränkungen durchgeführt.

So konnte am 15.11.2021 die Ingenieursstelle besetzt werden. Die neu eingestellte Ingenieurin arbeitete sich in ihre neue Aufgabe ein. Zudem hat sie bereits erste Trennexperimente mit dem Ziel des quantitativen Vergleiches der beiden zur Verfügung stehenden Magnetfiltern zusammen mit den Kollegen vom KIT-TMB durchgeführt (AP3).

Des Weiteren wurden Literaturrecherchen u.a. zu aktuellen Sieb- und Magnetseparationsverfahren durchgeführt.

Weiterhin wurde das Einstellungs- und Visumsverfahren für den neuen Doktoranden durchgeführt, so dass dieser voraussichtlich im ersten Quartal 2022 am 1.2.2022 seine Arbeit aufnehmen kann.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu den Arbeitspaketen)**

Da die Einstellung und Einarbeitung der geeigneten Kandidatin für die Ingenieursstelle erst Ende des Jahres erfolgte und die Promotionsstelle erst Anfang 2022 besetzt wird, kann momentan für das erste Halbjahr 2022 nur für die Ingenieurstätigkeit eine Prognose erstellt werden. Voraussichtlich können folgende Punkte bearbeitet werden: Im ersten Halbjahr 2022 werden weitere Trennexperimente durchgeführt. Weiterhin werden notwendige Analysen durch KIT-INE für die Projektpartner durchgeführt (AP3).

Die Doktorandenstelle wird voraussichtlich am 01.02.2022 besetzt. Für den Doktoranden stehen zunächst die Einstellung und Einarbeitung an. Die weiteren Schritte für die Doktorarbeit/Arbeitspakete (AP1) werden dann zusammen mit dem Doktoranden geplant und umgesetzt.

Regelmäßige Projekttreffen zu den gemeinsamen Arbeiten mit KIT-TMB werden durchgeführt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Zum jetzigen frühen Zeitpunkt des Verbundvorhabens besteht bereits gemeinsam mit TMB folgende Veröffentlichung:

Carla Olivia Krauß, Frank Becker, Muhammad Junaid Chaudhry, Horst Geckeis, Sascha Gentes, Alexander Heneka, Markus Plaschke, Dieter Schild: „Separation System for the Treatment of Secondary Waste from the Waterjet-Abrasive-Suspension-Cutting“, Paper und Vortrag, DEM 2021 (France, Avignon, 2021, September 13-15).

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) - Teilprojekt: Projektkoordination sowie ökologische und radiologische Bewertungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 546.398,72 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. Manuel Claus	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.claus@oeko.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Ziel des Teilprojektes ist es, eine plan- und termingerechte Bearbeitung aller Arbeitspakete zu gewährleisten.

Weiterhin koordiniert das Öko-Institut inhaltlich die Arbeiten zur Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential und ist zuständig für die umfangreichen Erfassungen der verfügbaren Informationen über Recherchen in Fachliteratur, Interviews bei EnBW sowie Zulieferern.

Schließlich arbeitet das Öko-Institut schwerpunktmäßig zur Ökobilanz, um die Verfahren der Separierung, der Aufbereitung und des Recyclings der relevanten Technologiemetalle im Vergleich zur Primärproduktion umfassend bewerten zu können. Aufbauend auf den Projektergebnissen wird das Öko-Institut unter Berücksichtigung aller radiologischen Szenarien, die der uneingeschränkten Freigabe zugrunde liegen, prüfen und empfehlen, welches Material zum Recycling herausgegeben bzw. uneingeschränkt freigegeben werden kann. Sollte die uneingeschränkte Freigabe nur durch Maßnahmen der Dekontamination oder Einführen prozessualer Schritte wie dem zielgerichteten Entfernen von Gehäuse oder Mantelteilen erreicht werden können, so werden Vorschläge erarbeitet. Abschließend koordiniert das Öko-Institut sämtliche Projektergebnisse zu einer Synopse und skaliert diese anschließend auf sämtliche Kernkraftwerke in Deutschland auf.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

#### **AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten**

#### **AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

Das Öko-Institut koordiniert inhaltlich die Arbeiten in AP 1 und ist zuständig für die umfangreichen Erfassungen der verfügbaren Informationen über Recherchen in Fachliteratur, Interviews bei EnBW sowie Zulieferern. Die gesammelten Erkenntnisse aus AP 1 sollen auf einer Meilensteinveranstaltung unter Teilnahme von Vertretern des Projektträgers vorgestellt und diskutiert werden.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

#### **AP 2.1: Demontagestudien**

#### **AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten**

Das Öko-Institut unterstützt die federführenden Partner für AP 2 bei den Arbeiten.

### **AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

#### **AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

#### **AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

Das Öko-Institut unterstützt die federführende Electroycling GmbH bei der Ableitung der Recyclingpotenziale sowie der Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen. Zur Durchführung eines Meilensteinworkshops wird das Öko-Institut die Koordination übernehmen und alle Partner entsprechend einbinden.

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

#### **AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

#### **AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

#### **AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

Die Öko-Bilanz sowie die methodischen Betrachtungen zur Freigabe werden durch das Öko-Institut durchgeführt. Das Öko-Institut unterstützt die TUC bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, indem die optimierten Freigabeprozesse rückgespielt werden.

#### **AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

Die Forschungspartner verbinden ihre Forschungsergebnisse unter Koordination des Öko-Instituts gemeinsam zu einer Synopse und skalieren diese anschließend auf: Hierbei werden ausgehend von den Ergebnissen aus dem Rückbau der untersuchten Anlagen KKP 1 und KKP 2 entsprechende Hochrechnungen vorgenommen. Es wird dabei bei der Hochrechnung ein konservatives und ein optimistisches Szenario berechnet.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Zusätzlich zu den in der Regel 14-tägig stattfindenden Jour-Fixe hat das Öko-Institut am 20.-21. September ein hybrides Projekttreffen mit allen Partnern unter Teilnahme des Projektträgers durchgeführt.

Im Rahmen des AP 1.1 hat das Öko-Institut bereits Werkstoffdaten zu kerntechnischen Komponenten in erheblicher Stückzahl verarbeitet und systematisch ausgewertet. Die hierfür erforderliche Internetrecherche ist durchgeführt worden. Am 1.9. wurden zur weiteren Datenerhebung systemzuständige Ingenieure der EnKK online konsultiert.

Für die Recherchearbeiten hat das Öko-Institut am 16.11.21 den Kraftwerkstandort in Philippsburg begangen, dabei den Zutritt zu sämtlichen Kontrollbereichen des KKP 2, sowie das Notspeisegebäude sowie das Reststoffbearbeitungszentrum GNR erhalten. Diese Informationen flossen in die weiteren Recherchearbeiten ein.

Im Rahmen des AP 1.2 erhebt das Öko-Institut in Zusammenarbeit mit der EnKK die Zuordnung der interessanten Komponenten in Freigabepfade, nachdem sie den etablierten Reststoffbearbeitungsprozess durchlaufen haben.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Auswertung der Werkstoffdaten für die AP 1.1 und AP 1.2 wird weiterhin fortgesetzt. Dabei soll nunmehr ein stärkerer Fokus auf die Verteilung der verwendeten Metalle bei Herstellung der Komponenten nach ursprünglichen Anforderungen und Spezifikation geachtet werden. Weiterhin sind Interviews mit Herstellern geplant. Dies wird jedoch auch in wechselseitiger Abhängigkeit zu den vorliegenden Ergebnissen der Partner in AP 2 erfolgen.

Nach Möglichkeit soll am 1.2.22 beim zweiten Projekttreffen teilgenommen werden.

Der ursprünglich für April 2022 vorgesehene und vom Öko-Institut durchzuführende Meilensteinworkshop soll verschoben werden.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Bislang keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Clausthal - Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) - Teilprojekt: Entwicklung von Recyclingstrategien und Identifizierung von ökonomischen Verwertungswegen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 635.516,58 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> daniel.goldmann@tu-clausthal.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotenzialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerkbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Ziel des Teilprojektes ist eine Erhebung der stofflichen Zusammensetzung der zuvor identifizierten Komponenten und eine anschließende Gehaltsermittlung der enthaltenen Technologiemetalle und Sonderlegierungen mithilfe von Demontagestudien. Basierend auf den

dabei gewonnenen Erkenntnissen und Daten werden komplette Demontageverfahren entwickelt. Für ausgewählte werkstofflich interessante Komponenten werden umfassende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung sowie die chemische Analytik durchgeführt. Die bei den Untersuchungen entwickelten Demontage- und Aufbereitungsverfahren werden anschließend mittels einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewertet und mit den Kosten sowie Erlösen der derzeitigen Entsorgungspraxis verglichen, um die Wirtschaftlichkeit einer umfangreicheren Demontage bzw. Aufbereitung mit dem Ziel der Sondermetallrückgewinnung zu ermitteln. Dafür werden die variablen und fixen Kosten von Demontage, Dekontamination, Aufbereitung und Entsorgung sowie die Erlöse für die Metallfraktionen bzw. Komponenten betrachtet.

Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern für alle betrachteten Anlagenteile durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotenzial**

**AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten** (TUC (gemeinsam mit ÖI und ECG): Systematische Erfassung der Anlagenteile und Komponenten für weitere Untersuchungen)

**AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2** (TUC: Koordination)

**AP 2.1: Demontagestudien** (TUC: Ermittlung der Zusammensetzung der Komponenten durch Demontagestudien und Entwicklung kompletter Demontageverfahren)

**AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten** (TUC (gemeinsam mit ECG): umfassende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung ausgewählter, wertstofflich interessanter Komponenten; TUC: chemische Analytik der Bestandteile)

**AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts** (TUC: Unterstützung durch Erfahrung zur Verwertung von Materialgruppen und Ableitung von Recyclingpotenzialen von Technologiemetallen und Speziallegierungen)

### **AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

**AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung** (TUC: Koordination)

**AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung** (TUC: Ermittlung der Wirtschaftlichkeit der ermittelten Demontage-, Vorbehandlungs-, Recyclingverfahren der Komponenten, die Technologiemetalle und Speziallegierungen enthalten, unter Berücksichtigung der Erlöse der Materialfraktionen)

### **AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

### **AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

**AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland** (TUC gemeinsam mit allen Projektpartnern: Zusammentragen der Forschungsergebnisse, Erstellung eines Leitfadens für den optimalen Rückbau von KKW mit Bezug zu Technologiemetallen und Speziallegierungen)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die Arbeiten in AP 1 zur Identifikation und Vorauswahl geeigneter Anlagenteile und Komponenten wurden weitergeführt. Darauf aufbauend fand eine erste Versendung von entsprechenden Bauteilen der EnKK an die TUC und Electrocyling GmbH statt, sodass mit der Bearbeitung des AP 2 und der Erhebung der stofflichen Zusammensetzung begonnen werden konnte. Die versendeten Komponenten des Prozessleitsystems wurden in Hinblick auf die verbauten Einzelteile charakterisiert. Mit einer Auswertung der Anzahl an Widerständen, Kondensatoren, Gleichrichtern etc. können Rückschlüsse auf das Wertstoffpotenzial gezogen werden. Es wurden und werden u.a. Untersuchungen durchgeführt, ob durch optische Methoden aus den verzinnten Leiterbahnen Rückschlüsse auf den Kupfergehalt der einzelnen Leiterplatten gezogen werden können. Die Wertstoffinhalte der einzelnen Komponenten gehen aus auffindbaren Datenblättern nur bedingt hervor, sodass exakte Angaben chemische und RFA-Aufschlüsse erfordern. Die TUC hat die Suche nach einem RFA-Handspektrometer abgeschlossen und die Bestellung eines Gerätes vorgenommen, welches mit einer Lieferverzögerung im 2. Quartal 2022 geliefert werden soll. Zur Abstimmung und Aufklärung über den aktuellen Stand wurden einstündige Jour-Fixe-Termine abgehalten, die im zweiwöchentlichen Abstand mit allen Projektpartnern durchgeführt werden.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im weiteren Vorgehen des AP 1 wird die Liste der Anlagenteile und Komponenten mit hohem Recyclingpotenzial vervollständigt. Im AP 2 wird die TUC chemische Analysen sowie erste Untersuchungen mit dem gelieferten RFA-Handspektrometer durchführen und die Liste der Recyclingrouten komplettieren. Die TUC und die Electrocyling GmbH erwarten weitere Lieferungen seitens der EnKK, sodass in Zusammenarbeit weiter an der Erhebung der stofflichen Zusammensetzung der ausgewählten Komponenten gearbeitet werden kann. Die durchgeführten zweiwöchentlichen Jour-Fixe-Termine werden in Zukunft weitergeführt. Neben einem ersten Vor-Ort-Termin in Philippsburg sind weitere Projekttreffen geplant.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Bisher keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 30.06.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> EnBW Energie Baden-Württemberg AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen - RecTecKA Verbundprojekt: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) - Teilprojekt: Identifikation und Bereitstellung von Komponenten zur Untersuchung sowie Integration relevanter Ergebnisse zur Berücksichtigung im Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 252.582,85 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Rolf Etges	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> r.etges@kk.enbw.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Ziel des Teilprojektes ist es, eine plan- und termingerechte Bearbeitung aller Arbeitspakete zu gewährleisten.

Der Tätigkeitsschwerpunkt der EnBW Kernkraft GmbH liegt in der Identifizierung von Bauteilen und Komponenten, die für eine nähere Untersuchung relevant sein könnten. Dies wird sowohl für den Reaktortyp Siedewasserreaktor (SWR, KKP1) als auch für den Druckwasserreaktor (DWR, KKP2) durchgeführt. Des Weiteren werden die relevanten Daten zu den Komponenten in Stück- und Werkstofflisten, Datenblättern, Anlagenbeschreibungen etc. recherchiert und zur Verfügung gestellt.

Im Anschluss werden die relevanten Bauteile und Komponenten gesichert und für eine Untersuchung bezüglich ihrer Recyclingfähigkeit und Rückgewinnungspotentials für Technologiemetalle bereitgestellt. Mit Ergebnis der Untersuchungen erfolgt eine Bewertung hinsichtlich des derzeitigen Abbau- und Freigabeprozesses sowie ggf. eine Optimierung der Prozesse.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

#### **AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten**

#### **AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

Die EnBW organisiert in diesem Arbeitspaket insgesamt die Recherche und Aufnahme der Datengrundlagen des Projektes. Dies geschieht durch eine Reihe von Vor-Ort-Workshops, Begehungen und Archivrecherchen, unterstützt durch das Öko-Institut und die TU Clausthal.

Die EnBW gleicht ihrerseits die vom Öko-Institut erstellten Listen kontinuierlich mit den Daten der in den Anlagen verbauten Bauteilen und Komponenten ab und führt auch eigene Recherchen durch. Dies erfolgt in den technischen Fachbereichen der EnBW einerseits in Einzelarbeit der Fachspezialisten andererseits in Experten-Interviews, die mit Unterstützung des Öko-Instituts durchgeführt werden.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

#### **AP 2.1: Demontagestudien**

#### **AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten**

Die EnBW stellt hierfür Demontearbeiten in der Anlage vor und stellt Material- oder Komponentenproben zur Verfügung, die freigegeben wurden.

### **AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

#### **AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

#### **AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

Die EnBW unterstützt die federführenden Partner für AP 3 bei den Arbeiten.

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

#### **AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

#### **AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

**AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

Die EnBW bringt hier Ihre Sicht und Erfahrung als Anlagenbetreiber ein und berät die übrigen Forschungspartner.

**AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

Die Forschungspartner verbinden ihre Forschungsergebnisse unter Koordination des Öko-Instituts gemeinsam zu einer Synopse und skalieren diese anschließend auf: Hierbei werden ausgehend von den Ergebnissen aus dem Rückbau der untersuchten Anlagen KKP 1 und KKP 2 entsprechende Hochrechnungen vorgenommen. Es wird dabei bei der Hochrechnung ein konservatives und ein optimistisches Szenario berechnet.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)**

Im aktuellen Berichtszeitraum standen Aktivitäten zu den AP 1.1, AP 1.2 sowie eine erste Vor-Ort-Begehung im Mittelpunkt. Im Rahmen des AP 1.1 wurden die vom Öko-Institut identifizierten Komponenten gelistet und priorisiert und an die technischen Fachbereiche der EnBW zur Bewertung hinsichtlich der Material- und Legierungsbestandteile weitergereicht. Die Liste wurde kontinuierlich fortgeschrieben, präzisiert und ergänzt.

Im Rahmen des AP 1.2 hat das Öko-Institut seine Methodik der strahlenschutztechnischen Bewertung vorgestellt. Die EnBW hat diese Methodik auch intern mit den entsprechenden Fachbereichen abgestimmt und liefert Informationen zum Dekontaminations- und Entsorgungsprozess.

Am 16.11.2021 konnte eine erste Vor-Ort-Begehung durchgeführt werden. Die pandemische Lage hatte sich kurzfristig erneut verschärft, weswegen der zweite Teil des Vor-Ort Termins nach intensiven Vorbereitungs- und Planungsarbeiten (Zugangsregelungen für nicht strahlenschutzüberwachte Personen etc.) erneut abgesagt werden musste. Ursprünglich vorgesehene Präsenzveranstaltungen, wie Workshops, gemeinsame Erhebungen in Ort Aufnahmen und Interviews waren in der ursprünglich geplanten Art und Weise nicht durchführbar.

Um dies zunächst zu kompensieren, wurden ersatzweise auf Basis von Listen des Öko-Institutes die Werkstoffdatenblätter zu identifizierten Komponenten zur Auswertung recherchiert und bereitgestellt.

Alternativ wurden lagernd verfügbare E- und Leitechnische Komponenten für die TU Clausthal und die Firma Electrocyling zusammengestellt und zur weiteren Untersuchung an die Partner versandt.

**4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)**

Für den 01.02.2022 ist das zweite Projekttreffen vorgesehen, das gemeinsam mit dem Öko-Institut vorbereitet und durchgeführt wird.

Ein angepasstes Vorgehen zum Ausgleich von Verzögerungen im Projekt aufgrund der pandemischen Situation soll konzipiert werden.

Für die weitere Systematisierung der Anlagenteile finden entsprechende Abstimmungen mit dem Öko-Institut statt.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Electrocycling GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (Retecka) – Teilprojekt: Ermittlung des intrinsischen Materialwerte	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 95.331,38 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Kevin Wille	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Kevin.wille@electrocycling.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Die spezifische Zielsetzung des Teilprojektes der ECG im Projekt besteht größtenteils in der umfassenden Dokumentation und Analyse des vorhandenen Materialbestands, Durchführung entsprechender manueller Demontage, Zerlegungen sowie mechanischer Aufbereitungsversuche

und der Erarbeitung von Daten und Informationen hinsichtlich der Charakterisierung und Vermarktung gefundener Materialien.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

ECG unterstützt die Partner TUC und Öko-Institut bei der Identifizierung von Anlagenkomponenten bzw. Vorauswahl möglicher Materialquellen aus dem Rückbau. Hier unterstützt die ECG mit ihrer Kompetenz als Recycler und Erzeuger von Metallfraktionen aus dem Recycling von Elektroaltgeräten und solchen Komponenten.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

ECG unterstützt in diesem Teil mit Zerlege- und Aufbereitungsversuchen und arbeitet hier eng mit der TUC. Teilziel in diesem AP ist die Erarbeitung geeigneter Demontage- und Zerkleinerungsschritte zum Materialaufschluss und Erzeugung vermarktungsfähiger Sekundärrohstofffraktionen

### **AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

Federführung in diesem AP hat die ECG. Nach Ermittlung geeigneter Verfahren sind die erzeugten Produkte auf ihre Vermarktungsfähigkeit, Materialwert und den Einsatz in geeignete Folgebehandlungsprozesse zu bewerten. Die Bewertung kann sowohl auf der Komponentenebene als auch auf der Ebene erzeugter Fraktionen erfolgen.

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

ECG unterstützt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Informationen aus den einzusetzenden Aufbereitungsprozessen

### **AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

## **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

In den ersten Monaten des Projektes liegt der Schwerpunkt auf der Recherche bzw. Identifizierung von Anlagenkomponenten, welche interessante, wirtschaftskritische bzw. Ressourceneffiziente Eigenschaften besitzen bzw. Materialien beinhalten. Gleichzeitig wurde eine Bewertung durchgeführt, inwieweit eine radioaktive Kontamination bzw. deren Aktivität und Halbwertszeit sich auf eine Verwendbarkeit im Recycling bzw. der Rückführung in die Kreislaufwirtschaft Einfluss nimmt. Federführend sind hier die Projektpartner Ökoinstitut und

EnBW. Electrocyling (ECG) kommentiert die bisherigen Ergebnisse und ergänzt diese in Projektmeetings bzw. in der für das Projekt eingerichteten Cloud.

Im weiteren Projektverlauf des zweiten Halbjahres wurden elektrotechnische Komponenten aus dem Ersatzteillager der EnKK der ECG zur Verfügung gestellt. Die Komponenten wurden katalogisiert und zunächst einer ersten Bewertung unterzogen. Durch die Corona-Krise konnte der geplante Anlagenbesuch in Philippsburg nicht stattfinden. Die Erkenntnisse bei einem Besuch vor Ort sollten Rückschlüsse geben, über den Zustand und die Verfügbarkeit relevanter Anlagenteile.

#### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Der Schwerpunkt liegt in der weiteren Untersuchung des durch die EnKK zur Verfügung gestellten Materialien. Hier erfolgt eine erweiterte Bewertung der Komponenten, fotografische Analyse, Zerlegung und Bewertung einzelner Bauteile mittels Röntgenfluoreszenzanalyse. Die Ergebnisse sollen Grundlage einer qualitativen Auswertung der Ressourceneffizienz beim Rückbau von AKWs liefern. Gemeinsam mit dem Projektpartner TU CLZ sollen dann tiefere Analysen (hydrometallurgisch) durchgeführt werden, um die Ressourceneffizienz zu quantifizieren. EnKK und ECG sind sich einig, dass ein wichtiger Schritt im Projekt das gemeinsame Verständnis der Abfallentstehung bei EnKK und die Behandlung/Verwertung bei der ECG sein kann. Daher ist der gegenseitige Austausch und Besichtigungen sehr wichtig für das Erreichen der Projektziele. Sobald es die Lage zulässt, sollen gemeinsame Besichtigungen durchgeführt werden.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Derzeit keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Derzeit keine

Berichtszeitraum: 01.10.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200 733, 80007 München Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Standort Dresden-Klotzsche, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: „Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle“ - TP: „Weiterentwicklung und Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases“	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 957.340,29 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Chem. H.–J. Friedrich	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt-wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bislang nur verbrannt werden. Die Kapazitäten hierfür sind begrenzt. Dies ist jedoch nicht für alle solche Abfälle möglich, was zu einem Entsorgungsproblem führt. Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein aussichtsreiches Alternativverfahren etabliert werden kann, das diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Das Verfahren soll hierzu weiter optimiert auf dieser Basis ein C-14-Recyclingprozess zur Verringerung des C-14-Umlaufs zu entwickelt und im Pilotmaßstab demonstriert werden. Auf diese Weise soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

- AP010: Projektkoordination und Administratives
- AP100: Vorbereitende Arbeiten
- AP200: Optimierung und Weiterentwicklung
- AP300: Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen
- AP400: Scale up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling
- AP500: Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte
- AP600: Fortschreibung Verwertungskonzept

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

- AP1: Die Kooperationsvereinbarung wurde erstellt, abgestimmt und fristgemäß von allen Projektpartnern unterzeichnet. Das kick-off-Meeting musste auf 2022 verschoben werden. Eine Doktorandenstelle wurde ausgeschrieben.
- AP2: Die Beschaffungsvorgänge für die zur Bearbeitung erforderlichen Ausrüstungsgegenstände laufen.
- AP3: Die Beschaffung der für die Optimierungsuntersuchungen benötigten C-14-markierten Referenzsubstanzen wurde eingeleitet.
- AP4: Es waren keine Arbeiten geplant.
- AP5: Es waren keine Arbeiten geplant.
- AP6: Es waren keine Arbeiten geplant.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

- AP1: Das erste Verbundmeeting ist für das I. Quartal 2022 geplant.
- AP2: Die Beschaffungsvorgänge und der Wiederaufbau der Technikumselektrolyseanlage werden fortgesetzt.
- AP3: Nach Lieferung der C-14-markierten Referenzsubstanzen und Fertigstellung des Versuchsaufbaus wird mit den Untersuchungen zur Freisetzungskinetik von C-14 aus verschiedenen Bindungsverhältnissen begonnen.
- AP4: Die Bearbeitung beginnt erst zu einem späteren Zeitpunkt.
- AP5: Die Bearbeitung beginnt erst zu einem späteren Zeitpunkt.
- AP6: Die Bearbeitung beginnt erst zu einem späteren Zeitpunkt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es sind keine für die Bearbeitung relevanten anderen Vorhaben bekannt.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

-keine-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2021 – 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle Teilprojekt: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C14-Bestimmg. mittels Flüssigszintillation und Untersuchung zur Freimessung von C14-Rückständen nach elektrochem. Behandlung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 – 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 179.459,84 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bislang nur verbrannt werden. Dies ist jedoch nicht für alle Abfälle möglich, was zu einem Entsorgungsproblem führt. Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden. Weiterhin sind die Kapazitäten für eine Verbrennung begrenzt.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein aussichtsreiches Alternativverfahren etabliert werden kann, dass diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Das Verfahren soll hierzu weiter optimiert werden, um auf dieser Basis ein C-14-Recyclingprozess zur Verringerung des C-14-Umlaufs zu entwickeln und im Pilotmaßstab zu demonstrieren. Auf diese Weise soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden. Durch die langjährige Erfahrung im Bereich der Strahlungsmesstechnik wird sich der VKTA hier bei der Entwicklung einer totzeitarmen C-14 Messmethode beteiligen. Weiterhin sollen die nach der elektrochemischen Totaloxidation anfallenden Reststoffe mittels der am VKTA vorhandenen Freimessanlage sowie Radioanalytik auf eine Freigabe überprüft werden. Die an den VKTA angegliederte Landessammelstelle Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen besitzt für die geplanten Untersuchungen C-14-haltige Reststoffe, welche vor der elektrochem. Totaloxidation vom VKTA hinsichtlich funktioneller Gruppen untersucht werden soll.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 100 Vorbereitende Arbeiten

AP 120 Eduktcharakterisierung (11/2021-05/2022)

### AP 300 Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung (11/2021-06/2023)

### AP 400 Scale up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling

AP 410 Scale up zur Pilotanlage (07/2023-03/2024)

AP 500 Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte (laufend)

AP 600 Fortschreibung Verwertungskonzept

AP 610 Verwertungskonzept (08/2024-09/2024)

AP 620 Sicherung des Know-how, wissenschaftliche Verwertung (04-2024-07/2024)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

AP 120 Eduktcharakterisierung

Von der Landessammelstelle Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen wurde eine Zusammenstellung der vorhandenen C-14 haltigen Abfälle angefertigt. Momentan laufen die Vorbereitungen für die Probenahme zur Charakterisierung der funktionellen Gruppen. Zusammen mit dem IKTS erfolgt eine Spezifizierung der gewünschten Analysen.

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung (11/2021-06/2023)

Für die (Weiter-)Entwicklung der totzeitarmen C-14 Messung wurde im ersten Schritt ein neuer Vielkanalanalysator angeschafft. Dieser fungiert gleichzeitig als Analog/Digital-Wandler. Momentan erfolgt die Anpassung sowie Optimierung der neuen Messtechnik an den vorhandenen Versuchsaufbau, mit anschließenden Validierungsmessungen.

### **4. Geplante Weiterarbeit**

Fortführung der oben genannten AP.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2021 bis 31.12.2021	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> IUT Institut für Umwelttechnologien GmbH Justus-von-Liebig-Str. 6, 12489 Berlin.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> »Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle« TP Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C14	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 148.838,38 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Frau Guthmann-Scholz	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> K.Guthmann-Scholz@iut-berlin.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt-wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bislang nur verbrannt werden. Die Kapazitäten hierfür sind begrenzt. Dies ist jedoch nicht für alle solche Abfälle möglich, was zu einem Entsorgungsproblem führt. Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein aussichtsreiches Alternativverfahren etabliert werden kann, das diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Das Verfahren soll hierzu weiter optimiert, auf dieser Basis ein C-14-Recyclingprozess zur Verringerung des C-14-Umlaufs entwickelt und im Pilotmaßstab demonstriert werden. Auf diese Weise soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

AP100: Vorbereitende Arbeiten

AP200: Optimierung und Weiterentwicklung

AP300: Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen

AP400: Scale up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling

AP500: Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte

AP600: Fortschreibung Verwertungskonzept

Die von IKTS/VKTA konstruierte Pilotanlage zur elektrochemischen Totaloxidation wird im Kontrollbereich Radioaktiv der IUT gemeinsam aufgebaut. Die Anlage zur Gasaufbereitung wird durch die IUT geplant, konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen.

Parallel wird mit dem Aufbau einer entsprechenden Einhausung (Handschuhbox/geschlossener Radionuklidabzug), mit Anbindung an die Absaugung und Fortluftüberwachung begonnen.

Fertig gestellt wird die Anlage durch Mitarbeiter der IUT und entsprechend den Vorgaben der IKTS betrieben. Hierbei werden reale, radioaktive, C14-haltige Lösungen zu Testzwecken verarbeitet, um in der elektrochemischen Totaloxidation die aktiven von den inaktiven

Bestandteilen weitestgehend zu separieren. Der entstehende aktive Gasanteil wird aufgearbeitet und das C14-haltige Kohlendioxid auf einer Molsiebkartusche gespeichert.

Über die Thermodiffusionsanlagen der IUT wird das C14 CO<sub>2</sub> soweit angereichert, dass es für zukünftige Synthesen von C14-markierten Feinchemikalien genutzt werden kann.

Alle Prozesse werden analytisch mittels Flüssigscintillationanalyse und Massenspektrometrie begleitet.

Zu diesen Tätigkeiten kommen allgemeine Arbeiten der Koordination über den gesamten Zeitraum des Verbundprojektes.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse**

#### **AP100**

Die für die elektrochemische Bearbeitung mit nachfolgender C14 Anreicherung geeigneten Abfälle wurden ermittelt:

- a. organische Syntheserückstände aus der Methanol Synthese
- b. wässrige Syntheserückstände aus der Acetat- und Propionat Synthese,
- c. Syntheserückstände aus den Cyanid Synthese

#### **AP200**

Das für die Charakterisierung des C14 CO<sub>2</sub> als Rohstoff für die Thermodiffusionsanlage sowie der aus der Isotopentrennung anfallenden Fraktionen erforderliche Massenspektrometer wurde beschafft, aufgebaut und in Betrieb genommen.

#### **AP300**

Die Verfahrensentwicklung für die massenspektrometrische Charakterisierung des C14 CO<sub>2</sub> für und aus der Thermodiffusion ist in Arbeit.

### **4. Geplante Weiterarbeit**

#### **AP300**

Abschluss der Methodenentwicklung für die massenspektrometrische Untersuchung der im Rahmen des Projekts anfallenden C14 CO<sub>2</sub> haltigen Gasfraktionen.

Vorbereitende Arbeiten und Materialbeschaffung für die Gasaufbereitungsanlage der aus der Elektrolyse anfallenden Gasfraktionen.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

- keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

- keine

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)